

配電線および需要家機器における雷被害の
発生機構とリスク評価
Mechanism and Risk Assessment of Lightning Damages
on Power Distribution Lines and Customer Equipment

2018年2月

早稲田大学大学院 先進理工学研究科
電気・情報生命専攻 誘電体材料研究

石本 和之

Kazuyuki ISHIMOTO

配電線および需要家機器における雷被害の発生機構とリスク評価

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 配電線の雷害対策を考える上で重要となる雷現象	4
1.2.1 配電線における雷サージの発生要因	4
1.2.2 季節毎の雷性状	6
1.3 我が国における配電線の雷害対策研究の変遷	8
1.4 配電線における雷被害実態	13
1.4.1 高圧配電線における雷被害実態	13
1.4.2 低圧需要家機器における雷被害実態	15
1.4.3 無線通信鉄塔への雷撃による配電線および需要家機器の雷被害実態	16
1.5 配電線の雷害対策に関する研究課題	19
1.6 本論文の構成	20
第1章の参考文献	22
第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案	26
2.1 はじめに	26
2.2 従来の高圧配電線雷事故発生率算定手法の概要	30
2.2.1 直撃雷に対する雷サージ解析モデルの構築	31
2.2.2 高圧配電線が雷事故に至る条件	32
2.2.3 モンテカルロシミュレーションによる雷事故発生率の推定	37
2.3 本論文で提案する雷リスク評価手法の概要	41
2.3.1 地域毎の大地雷撃密度の算出	41
2.3.2 配電線密度の増加に伴う直撃雷発生率の上昇を補正する係数の算出	41
2.3.3 配電線周辺の構造物による雷遮蔽効果を補正する係数の算出	44
2.4 提案手法を用いた実配電設備における雷リスク評価例	45

2.5 第2章のまとめ	48
第2章の参考文献	49
第3章 無線通信鉄塔雷撃時の配電線および需要家設備の雷害対策	52
3.1 はじめに	52
3.2 無線通信設備への雷撃による雷被害事例	53
3.3 本研究で検討を行った逆流雷対策の概要	55
3.3.1 無線通信設備への配電線からの電力供給方式	55
3.3.2 配電線への架空地線の施設	55
3.3.3 無線通信設備の接地と配電線側の接地の接続	55
3.3.4 柱上変圧器2次側へのSPD (Surge Protective Device)の取付け	57
3.4 試験配電線を用いた雷害対策の効果の検証	59
3.4.1 試験配電線路の構成	59
3.4.2 無線通信設備および需要家設備の模擬	61
3.4.3 試験方法	62
3.4.4 試験結果	66
3.5 雷サージ解析による雷害対策の定量評価	71
3.5.1 試験結果の再現による雷サージ解析の有効性の検証	71
3.5.2 実際の配電設備構成を考慮した雷サージ解析モデルの概要	75
3.5.3 雷サージ解析によるエネルギー面からの評価	77
3.6 第3章のまとめ	81
第3章の参考文献	83
第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策	84
4.1 はじめに	84
4.2 本研究で用いた電子式電力量計の概要	86
4.3 電子式電力量計内部の電源母線を通過する雷電流による故障様相	87
4.3.1 電子式電力量計電源母線を雷インパルス電流が通過した際の故障様相	87
4.3.2 演算処理部の磁界に対する耐性の評価	89

4.3.3 電源母線を雷電流が通過した際に演算処理部に発生する磁界の様相	91
4.3.4 電源母線を雷電流が通過した際に演算処理部に発生する磁界の様相	94
4.4 雷サージ解析に基づく磁界による電子式電力量計の故障発生率の算出	96
4.4.1 磁界による電子式電力量計の故障発生率算定手法	96
4.4.2 電子式電力量計の故障発生率算定結果	102
4.5 第4章のまとめ	105
第4章の参考文献	106
第5章 結論	109
謝辞	113
研究業績	114

第1章 序論

1.1 はじめに

我が国では、生活水準の向上や高度情報化社会の進展に伴う情報通信機器の導入の加速等により、社会生活の電気への依存度を高めており、電気事業者には、高品質な電力の安定供給が強く求められている。図 1-1 に電力システムの基本構成図を示すが、発電所にて発電した電気は、送電線、変電所、配電線を経由して、需要家に供給される。配電線の主な特徴として、①送変電設備と比べ電圧階級が低いことから、各機器の絶縁階級も低い、②設備が面的なネットワークを構成しており、設備量が膨大である、③需要家設備に直結しているため、配電線での事故が直接需要家に影響を及ぼす、といった点があげられる。これらの理由により、電力流通設備の供給支障事故件数の中でも、配電線の事故件数は最も多く、これまでも電気事業者は、配電線の設計、運用、保守等に多大な労力を費やしてきている。また、図 1-2 に示すように、現在においても、配電線の総亘長および配電設備数は増加し続けており^[1,2]、配電線における事故低減の取り組みは今後ますます重要になると考えられる。

図 1-3 に示すように高压配電線における供給支障事故は約半数が自然現象に起因しており、更にそのうちの 40 %程度が雷に起因するものである^[1,3]。このため、供給信頼度の確保のためには、雷による事故を低減することが重要となる。

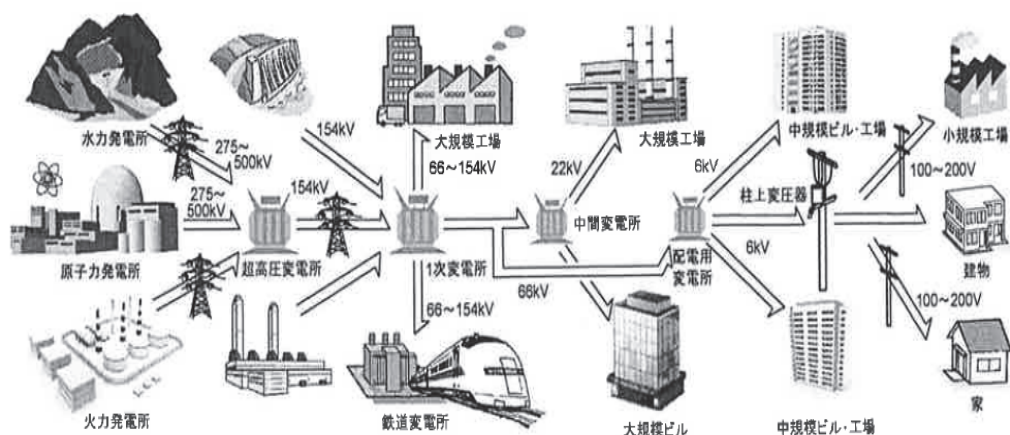


図 1-1 電力システムの基本構成図^[1,1]

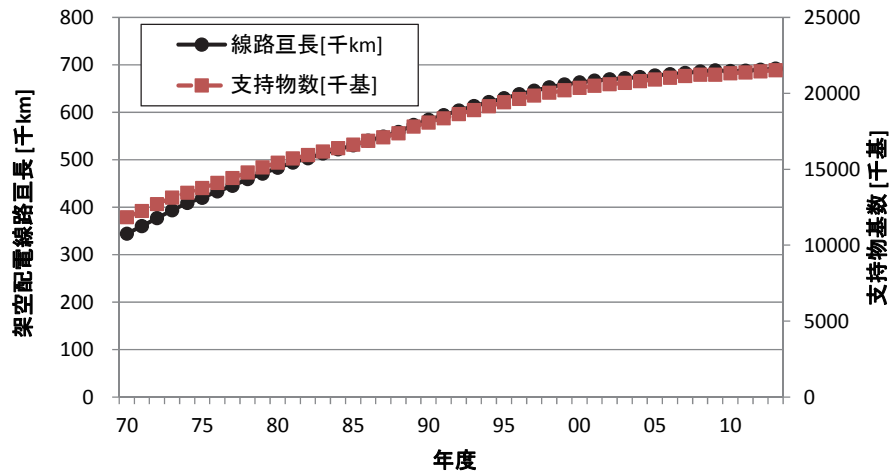


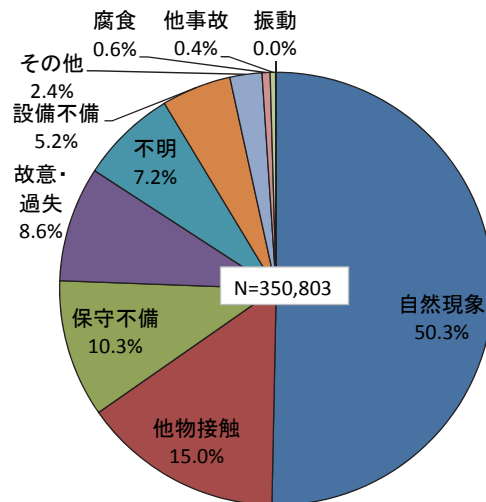
図 1-2 架空配電線路亘長および支持物基数の年度推移

これまで、我が国では、過去数十年にわたって高圧配電線の雷害対策に関する研究が行われてきており、その成果についてもガイドブック等の形で適宜取り纏められ^{[1.4]-[1.7]}、実用に供されてきた。これら一連の研究により高圧配電線の雷害対策は技術的にはある程度確立したといえる。このため、近年では、供給信頼度を維持しつつ電力流通設備への投資コストを低減することが新たな課題となり、費用対効果という観点から高圧配電線の雷害対策を検討することが求められている。

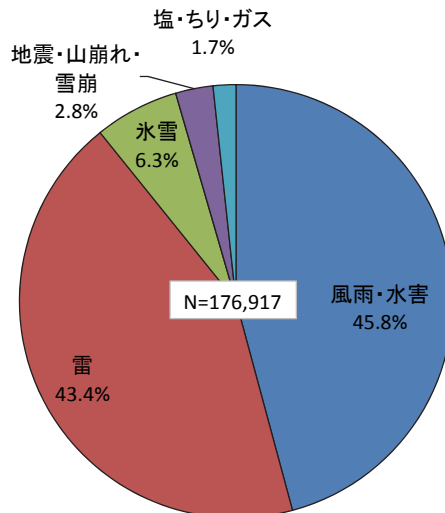
また、従来の配電線の雷害対策は高圧配電線を中心に行われてきたが、近年では高機能化された電子機器が需要家設備に多数導入されたことにより、低電圧で駆動する機器の雷被害も顕著となってきた^[1.8]。今後のいわゆる IoT 技術の進展に伴い、配電線においてもスマートメータに代表される、低電圧で駆動する配電機器の導入が増加すると考えられることから、低圧配電線の雷害対策の重要性が今後は増加していくものと考えられる。

以上のように、研究が本格的に始まってから数十年たった現在においても、配電線における雷害対策に関する課題は多く存在している。本章では、これまでの配電線の雷害対策研究の変遷および雷被害の現状について整理するとともに、これを踏まえた配電線の雷害対策における課題について述べる。

第1章 序論



(a) 原因別高圧配電線事故の構成比



(b) 自然現象別の配電線事故の割合

図 1-3 高圧配電線の供給支障事故割合（昭和 46 年～平成 21 年の合計）^[1.3]

1.2 配電線の雷害対策を考える上で重要となる雷現象

配電線は送電線に比べ絶縁強度が低いため、雷が配電線へ直撃する「直撃雷」のみならず、近傍への落雷により配電線上に誘導される「誘導雷」によっても雷事故が発生する可能性がある。また、配電線は需要家設備に直結しているため、需要家設備へ落雷した雷電流の一部が配電線に逆流する「逆流雷」による被害も報告されている。また、雷現象自体も夏季に多く発生する一般的な「夏季雷」と、日本海沿岸等の特定の地域で冬季に発生する「冬季雷」では雷性状が異なるため、季節毎で雷被害の様相は異なるとされている。

1.2.1 配電線における雷サージの発生要因

雷により配電線上に発生する雷過電圧および雷過電流の原因は図 1-4 に示すように大きく 3 つに分けることが出来る^[1.7]。

(a) 誘導雷

図 1-4(a)に示すように、配電線近傍に存在する樹木や構造物などに落雷した場合に、雷放電路上を進展する雷電流から放射される電磁波により、配電線の相導体上に誘導される雷過電圧のことを指す。

(b) 直撃雷

図 1-4(b)に示すように、配電線に雷が直撃する現象を指し、誘導雷に比べ、発生する雷過電圧や流入する雷電流ともに極めて大きなものとなる。一般的に、配電線における直撃雷とは、配電線の相導体のみならず、コンクリート柱や架空地線など全ての配電線構成物への雷撃を指す場合が多い。

(c) 逆流雷

図 1-4(c)に示すように、高構造物（無線通信鉄塔や風車等）へ落雷が発生した際の接地電位上昇によって、電力を供給している配電線へ雷電流の一部が侵入する場合がある。この現象を逆流雷と呼び^[1.9]、構造物の設備構成によっては、構造物側では被害が発生せずに、配電線のみで被害が生じることもある。これまで、逆流雷による雷被害は、日本海沿岸地域の山頂に位置する無線中継所等に電力を供給する配電線で多く報告されている^[1.10]。これは、山頂負荷設備が雷撃を受けやすいことや、大地抵抗率が高い山岳地帯に設置されており、接地抵抗値が高いため、配電線に多くの雷電流が分流しやすいことに起因している。

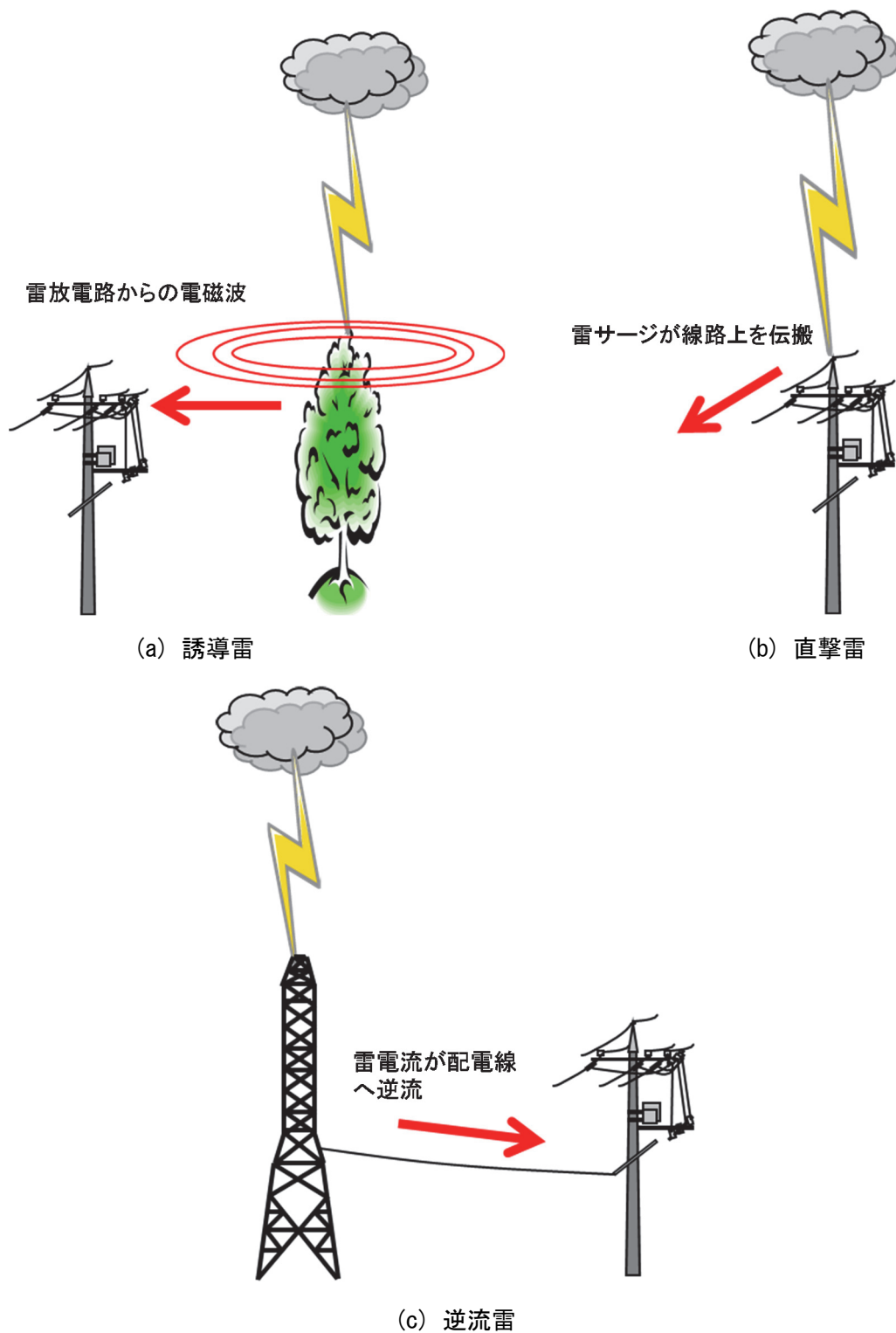


図 1-4 配電線における雷サージの発生要因

第1章 序論

1.2.2 季節毎の雷性状

日本の各地で主として夏季に観測されている夏季雷は、世界的にも一般的に観測される雷とほぼ同一の性質を有している。しかし、これとは別に、日本海側沿岸部とノルウェーの大西洋側沿岸部で主に冬季に発生する冬季雷は、世界的には非常に珍しい気象現象である。両者は表 1-1 および以下の説明のように大きく異なる特徴を有している。

(I) 夏季雷

- ・雲底の高度が高いため、構造物の高低に関わらず、どこにでも雷撃する可能性がある。
- ・雷電流継続時間が比較的短い場合が多い。
- ・負極性雷撃の割合が多い。

(II) 冬季雷

- ・夏季雷に比べ雷雲の高度が低いため、雷雲との距離が近い高構造物に雷撃が集中しやすい。
- ・雷電流の継続時間が非常に長い場合がある。このため、配電線への直撃雷が発生した場合には、

表 1-1 夏季雷と冬季雷の特性比較^[1, 7]

分類	特 性			雷 放 電	
	過程	項 目	単 位	夏 季 雷	冬 季 雷
雷 雲	雲	底	m	$\sim 2 \times 10^3$	300~1000
放 電 特 性	リーダ	速度 電 荷 密 度 ステップの時間間隔	m/s C/m μs	$(1 \sim 26) \times 10^5$ $10^{-4} \sim [10^{-3}] \sim 10^{-1}$ 30~[50]~125	$(1 \sim 5) \times 10^5$ $10^{-4} \sim [10^{-3}] \sim 10^{-1}$ 27~300
	リターン・ストローク	速度 電 流 波 高 値 電 流 し ゅ ん 度 電 流 波 頭 長 電 流 波 尾 長	$10^7 m/s$ kA kA/ μs μs μs	2~[8.0]~16 <5~[24]~250 <1~[10]~80 <1~[2]~30 10~[40]~250*	12~23 <2~[24]~150< 0.01~[0.63]~100 0.1~[32]~ 10^4 1~[50]~ 10^4
	雷撃時の地上電界		kV/m	~[10]~	35~170
	電 荷 *		C	3~[25]~90	0.1~[3.5]~ 3×10^3
	極 性			殆ど負極性(95%)	正極性 1/3~1/2
	放電の進展方向			殆ど下向き	鉄塔への雷撃は上向きが多い
	放 電 時 間		s	$10^{-2} \sim [0.2] \sim 2$	$10^{-5} \sim 0.5 <$

注) 1)*連続電流含む

2) $a \sim [b] \sim c$ とは、 $a \sim c$ の範囲で**[b]**が代表値となる

3)エネルギーは推定値

第1章 序論

避雷器等の雷電流を大地へ放出する機材のエネルギー処理量が、夏季雷の数百～数千倍程度になることもある。このため、冬季雷発生地域では避雷器の雷故障の割合が夏季の数倍になるとも報告されている。

- ・夏季雷に比べ正極性雷撃の割合が多い。

図 1-5 に落雷位置標定システムにより観測された落雷密度分布を示す^[1.11]。同図から夏季では北関東や中部地方、九州中央部で多く落雷が発生しているのに対して、冬季では日本海沿岸に落雷が集中しており、冬季の落雷数は夏季に比べ少なくなっている。

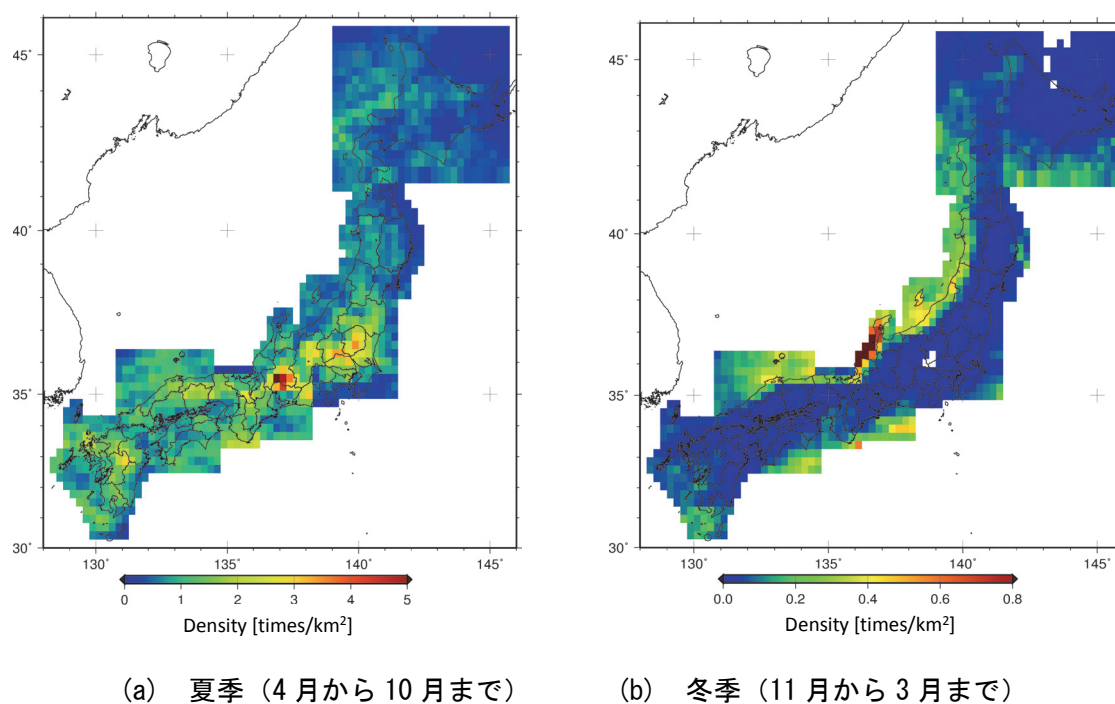


図 1-5 夏季と冬季の落雷密度分布（2009 年度から 2013 年度までの平均）^[1.11]

第1章 序論

1.3 我が国における配電線の雷害対策研究の変遷

前節で述べたように高圧配電線には複数の要因で雷過電圧・過電流が発生するが、我が国においては、これらに対する研究開発は高圧配電線を中心として、図 1-6 に示すように過去数 10 年間にわたって進められてきた。

研究が始まった当初は、絶縁強度が送電線に比べ低い高圧配電線では、直撃雷による雷事故はやむを得ないものと考えられ、高圧配電線の雷害対策の主対象は誘導雷とされてきた^{[1.4][1.6]}。誘導雷に対する雷害対策としては、古くから図 1-7 に示す避雷器の適用が行われ、内部に使用される特性要素も P バルブ、炭化ケイ素、酸化亜鉛素子と変化してきた。また、1970 年代頃からは避雷器に加え、図 1-8 に示す架空地線の設置も併せて行われてきた。

1980 年代に入ると、数値解析によって、避雷器や架空地線の誘導雷に対する雷過電圧の低減効果を定量的に評価する手法が開発され^[1.12]、本手法を用いた計算結果から、架空地線の有無にかかわ

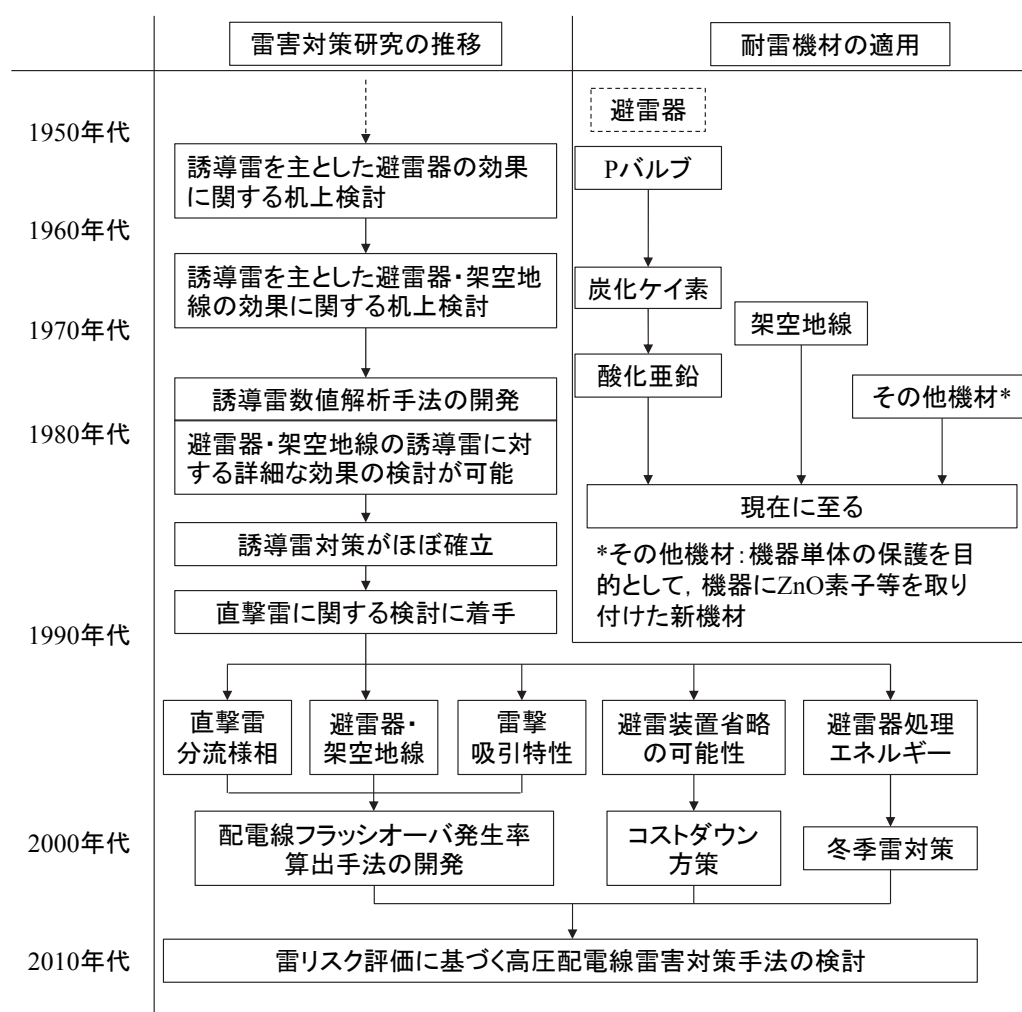


図 1-6 我が国における高圧配電線の雷害対策研究の変遷

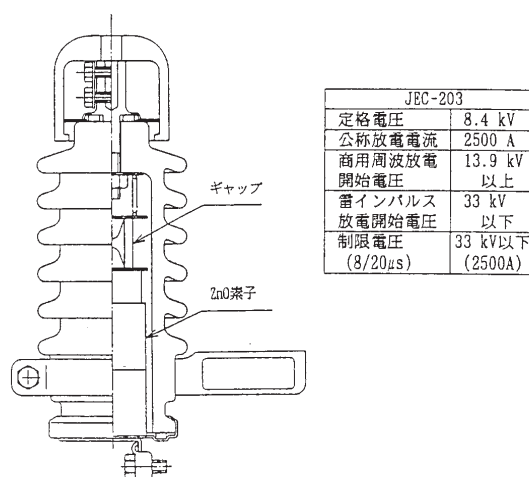


図 1-7 酸化亜鉛素子を用いた避雷器の構造の一例^[1.7]

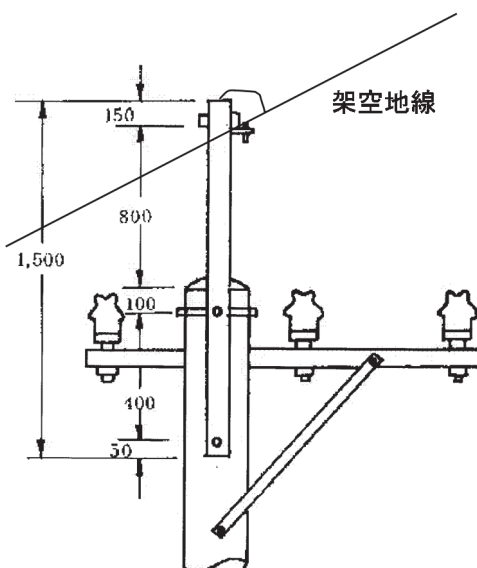


図 1-8 配電線への架空地線の施設例^[1.7]

らず、避雷器を 200 m 程度の間隔で取り付ければ、誘導雷による雷事故が防止できることが明らかになった^[1.13]。これら一連の研究により、1980 年代後半には誘導雷に対する雷害対策手法がほぼ確立し、現在では、我が国においては誘導雷による雷事故は殆ど生じない状況となっている^[1.14]。一方で、諸外国では、配電系統が我が国と異なり中性点接地方式である場合が多く、1 相のフラッシュオーバーによる地絡でも雷事故に至る可能性が高いことや、雷害対策が我が国ほど充実していない場合が多いこと等の理由により、依然として誘導雷が高圧配電線の雷害対策の主対象となっており、現在においても、精力的に研究が進められている^{[1.15][1.18]}。

その後、1990 年代に入り、我が国では、横山らによって、高圧配電線雷害対策の対象に直撃雷も含めることが提唱され、実規模試験配電線を用いた多数の実証研究が実施されるようになった

第1章 序論

[1.19][1.20]。1990年代半ばには、これらの実験的検討に加え、解析面からの検討^{[1.21],[1.22]}を通じて、図1-9に示すように、架空地線と避雷器を適切に取付けることにより、従来、保護は不可能であると考えられてきた直撃雷に対しても高压配電線を保護できる可能性があることが示された。このため、誘導雷に対する対策が確立した近年では、直撃雷が我が国の高压配電線の雷害対策の主対象となっている。

また、直撃雷に対する研究の進捗に合わせ、多くの電気事業者において、図1-10に示すような避雷装置と呼ばれる新たな耐雷機材の開発・導入も進んでいる^[1.7]。避雷装置とは、がいしや柱上変圧器等の配電機器の雷保護を目的としており、接地抵抗値に関係なく、保護対象機器に発生する雷過電圧を避雷装置の動作開始電圧以下に抑制できる。避雷装置は取付けに当たり、接地工事が不要である場合が多いことから、コストの面から避雷器よりも有利となっている。

この他、1990年代には、大きなエネルギーを有する冬季雷が、図1-11に示すような山頂に設置された無線通信鉄塔へ雷撃した際に配電系統へ逆流する雷電流（逆流雷）による、避雷器をはじめとした配電機器の雷被害が問題となり、効果的な雷害対策手法に関する研究が精力的に実施された。この結果、図1-12に示すように、冬季雷発生地域において避雷器の被害を防ぐためには、複数

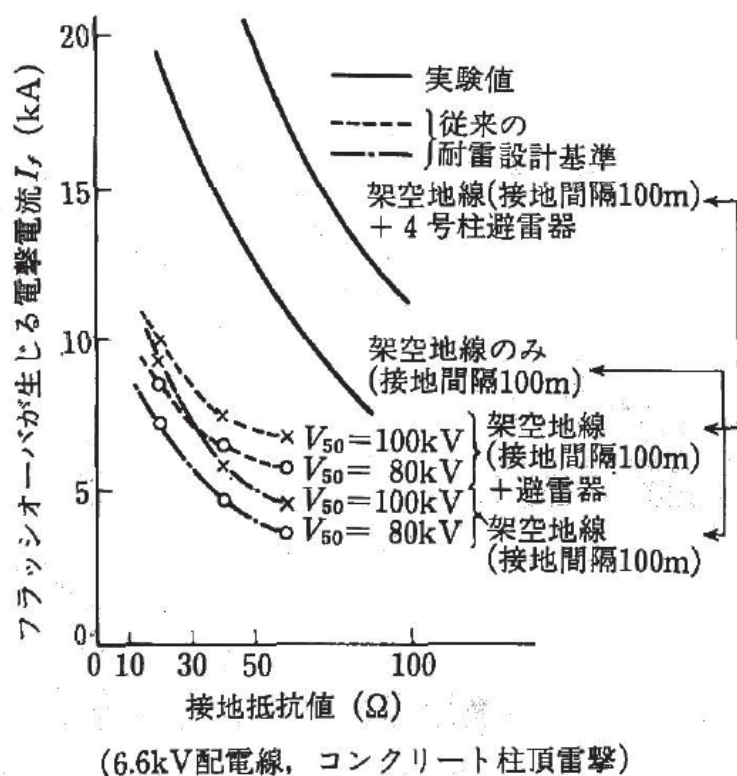


図1-9 架空地線と避雷器が取付けられた高压配電線においてフラッシュオーバーが発生する電流値^[1.23]

第1章 序論

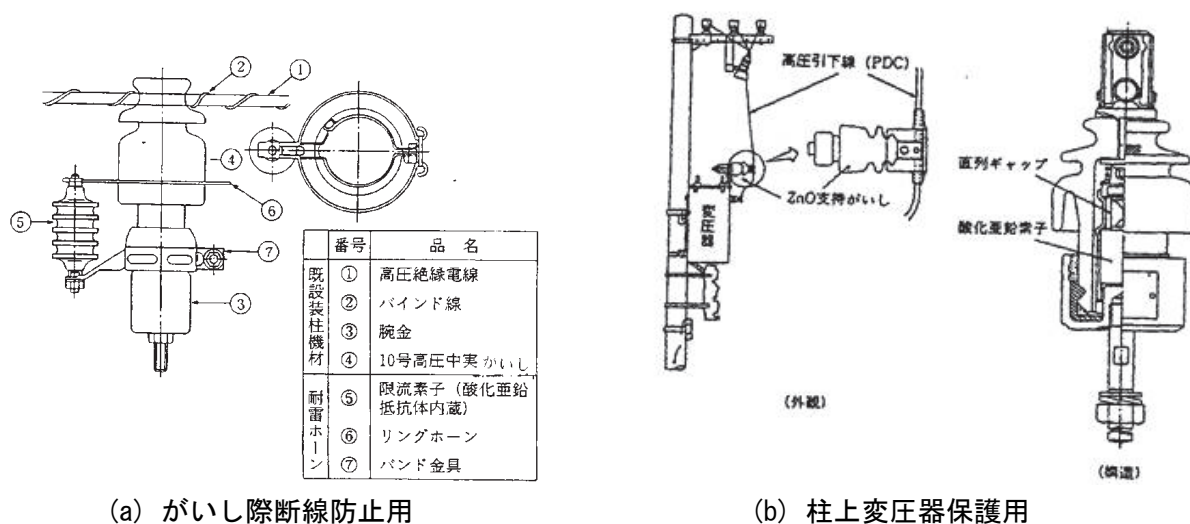


図 1-10 高圧配電線に適用される避雷装置の一例^[1.7]

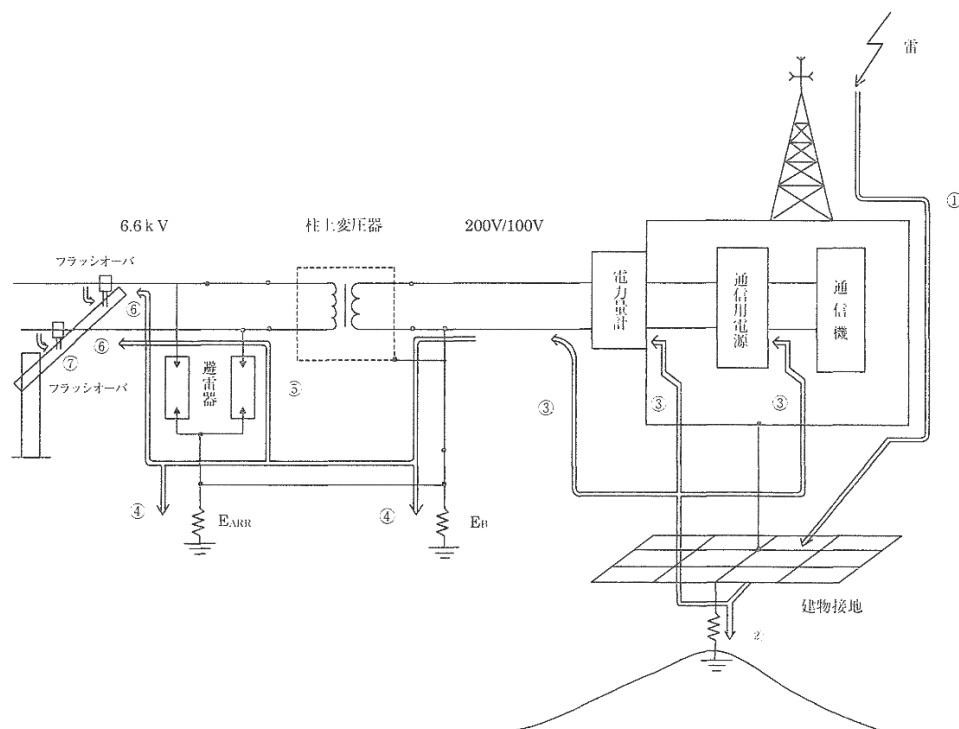


図 1-11 無線通信鉄塔への雷撃に伴う配電線への雷サージ侵入経路^[1.10]

の架空地線を架線することや避雷器のエネルギー耐量を格上げすることが効果的であることが明らかとなった^[1.23]。

更に 1990 年代後半以降は、供給信頼度を維持しつつ雷害対策に投資するコストを低減することが極めて重要な課題となり、通常高圧配電線 3 相に取付ける避雷器を 1 相分省略した場合の耐雷性能の評価^{[1.24]-[1.26]}や設備構築コストを考慮したフラッシュオーバー発生率計算手法の開発^[1.27]、避雷器の

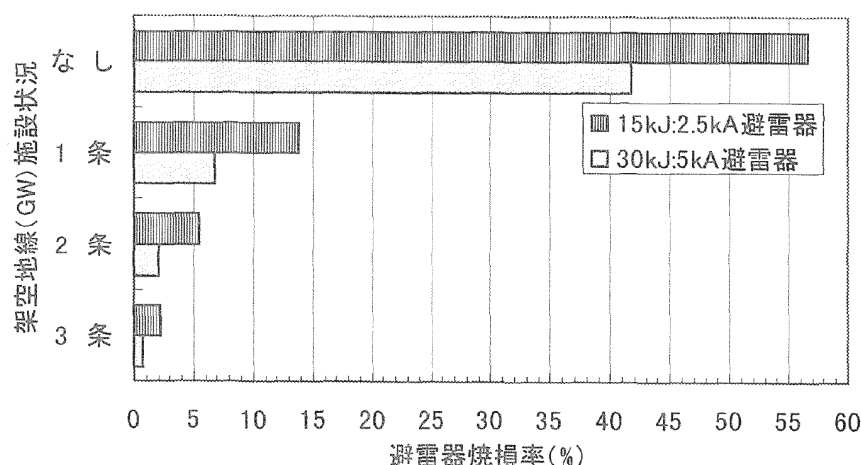


図 1-12 避雷器焼損率低減のための対策の効果^[1.10]

接地抵抗値が高圧配電線雷保護効果に与える影響^[1.28]などの投資コストの低減を目的とした研究が多くなされるようになってきた。また、近年では、雷リスクマネジメントという観点から雷害対策を行うことが提唱されており^[1.29]、この一環として夏季と冬季の雷性状の相違や配電設備数等を考慮し、地域・気節毎の配電線の雷に対する危険度を評価する試みも進められるようになってきている^{[1.30]-[1.32]}。

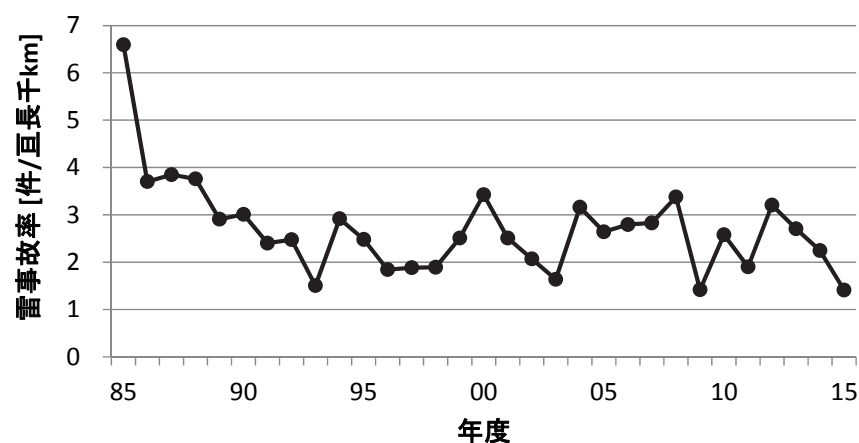
また、高圧配電線の雷害対策の技術的確立にあわせ、2000年代頃からは低圧配電線や需要家家屋の雷害対策が重要な課題となってきた。これは、低電圧で駆動する機器の各家庭への導入数が増加したことに伴い、低圧配電線や需要家家屋の雷被害が問題となってきたためである^[1.8]。近年では、国内外において、雷観測、実験および解析の多方面から多くの検討が実施されており^{[1.33]-[1.38]}、雷の侵入経路や需要家設備内の各機器の接地方式毎の雷サージの発生様相が明らかにされてきている。

1.4 配電線における雷被害実態

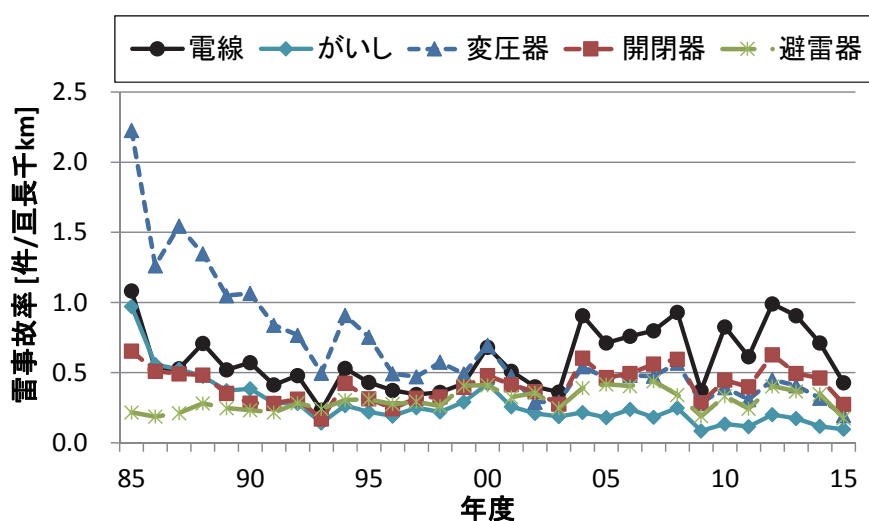
1.4.1 高圧配電線における雷被害実態

図 1-13(a)に我が国における高圧配電線の雷事故率の推移を示す^{[1.39]~[1.42]}。なお、ここで示す雷事故とは、供給支障事故のことを示し、再閉路成功事故については含んでいない。前節で述べたとおり、誘導雷に対する雷害対策手法が確立し、避雷器や避雷装置等の耐雷機材の施設数が大幅に増加した 1980 年代後半から、1990 年代前半にかけて雷事故率が大幅に減少し、その後の 20 年程度はほぼ横ばい傾となっている。

図 1-13(b)に配電機材（電線・がいし・変圧器・開閉器・避雷器）別の雷事故率の推移を示す。電線、がいし、変圧器、開閉器の事故は主に雷過電圧によるフラッシュオーバーに、避雷器の事故は雷電流のエネルギーに起因しているものが多い。同図から、2000 年頃までは変圧器の事故率が最も高くなっている。これは、柱上変圧器の雷インパルス耐電圧値が 60 kV であり、配電機材の中でも絶縁



(a) 雷事故率の推移



(b) 機材別の雷事故率の推移

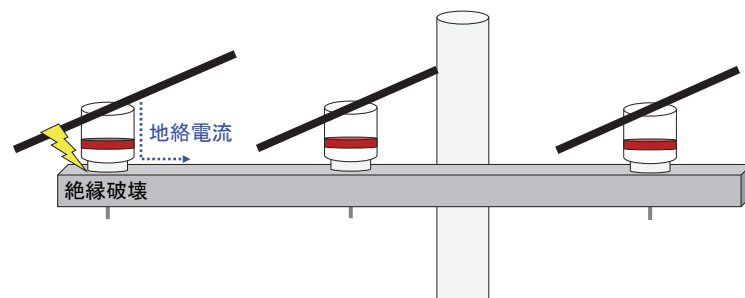
図 1-13 高圧配電線の亘長当たりの雷事故率の推移^{[1.39]~[1.42]}

第1章 序論

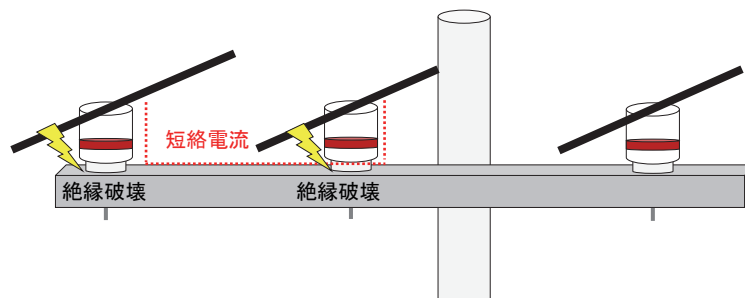
強度が比較的低いためである。しかしながら、前節で述べたように、柱上変圧器保護用の避雷装置や酸化亜鉛素子内蔵柱上変圧器の導入が進んだことにより^{[1.7][1.43]}、近年では柱上変圧器の雷事故率は他の機材と同等程度まで低減している。

柱上変圧器の雷被害の減少により、2000年代後半からは電線の雷被害が最も多くなっている。図1-14に配電線が雷により断線に至る過程を示す。我が国の配電線は非接地系統であり地絡電流が小さいため、図1-14(a)のように雷によるフラッシュオーバーが1相のみで生じ、地絡電流が流れた場合には、アークが自然消弧し、がいしの絶縁が回復するため、断線に至ることは少ない。一方で、図1-14(b)に示すように、2相以上でフラッシュオーバーが生じた際には相間で短絡に至り、配電用変電所の過電流リレーが動作するまで短絡電流が流れ続け、これにより断線が発生する。我が国では、公衆安全確保の観点から絶縁電線を使用しているため、フラッシュオーバー発生時には絶縁被覆に小さなピンホールが発生するが、このピンホールにアークスポットが固定されてしまうことにより、絶縁電線は裸電線に比べ雷断線が発生しやすくなっている^[1.7]。

また、避雷器の雷被害率は低いものの、一貫して増加傾向にあることが伺える。これは、前述のように避雷器や避雷装置の設備数の増加に伴い、過大な雷のエネルギーにより故障に至る避雷器の数も増加したためであると考えられる。このため、今後の高圧配電線の雷害対策は雷過電圧によるフラッシュオーバーのみならず、雷のエネルギーによる避雷器の焼損も含めて考える必要がある。



(a) 1相フラッシュオーバーによる地絡



(b) 2相フラッシュオーバーによる短絡

図1-14 雷による断線に至る過程

第1章 序論

1.4.2 低圧需要家機器における雷被害実態

低圧需要家機器については高圧配電線と異なり、雷事故の報告義務等はないため、その実態が正確に明らかになる場合は少ない。これまでに、アンケート調査等により、1980年代から2000年代半ばまでの約20年間に亘る需要家機器の雷被害様相の変遷について調査が行われており^[1.8]、ここではこの結果について示す。

需要家機器を設置形態別に表1-2のように区分した際の需要家機器別の雷被害割合を図1-15に示す^[1.8]。1987～91年ではテレビなどアンテナ系機器の被害割合が多くなっているが、本格的な高度情報時代を迎え、PCの各家庭への普及が一般になってきた2004～05年及び06年では、テレビ等のアンテナ系機器の被害割合が減少し、パソコンや電話・FAX等の通信系機器の被害割合が増加している。通信系機器は電力線と通信線の両方が接続されるため、雷の侵入経路が多くなるとともに、

表 1-2 需要家機器の区分^[1.8]

区分	機器の分類	機器の使用状態	分類例
[I]	非接地系	AC電源に接続され、筐体が非接地となっている機器	掃除機
[II]	接地系	AC電源に接続され、筐体が接地されている機器	給湯器 エアコン
[III]	アンテナ系	AC電源に接続され、かつアンテナを有する機器	テレビ VTR
[IV]	通信系	AC電源と通信線の両方に接続されている機器	電話/Fax パソコン

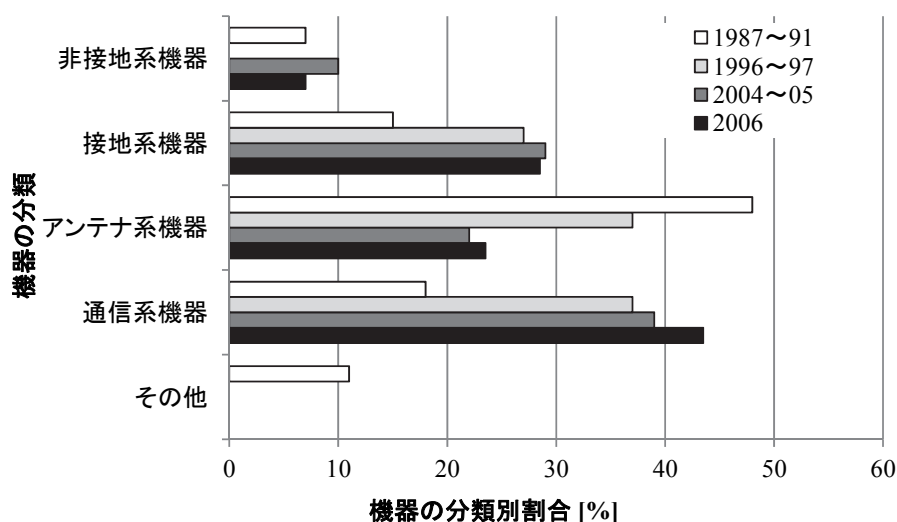


図 1-15 家電機器別の雷被害発生割合の推移^[1.8]

これらの間に発生する電位差によって内部を雷電流が通過するため、故障が生じやすいものと考えられる。

図 1-16 に需要家機器が雷被害を受けた世帯の被害発生率 [%/世帯/年]およびこれを年間雷雨日数で正規化した値を示す^[1.8]。なお、雷雨日数は気象庁発表の各地域（県庁所在地）の平均値を用いている。機器の雷被害発生率は 1980 年代および 1990 年代は何れも 0.5 %/世帯/年程度であったが、本格的な高度情報時代を迎えた 2004～05 以降で急増し、2.0 %/世帯/年程度まで達していることが分かる。このように、近年では需要家機器の電子化が進み、これまで以上に雷害対策が重要となってきた。

1.4.3 無線通信鉄塔への雷撃による配電線および需要家機器の雷被害実態

近年の情報通信エリアの拡大や通信速度の高速化に伴い、図 1-17 に示すように、無線通信設備が急増している^[1.44]。無線通信設備は図 1-18 に示すように、地上高 10～40 m 程度の鉄塔と局舎により構成され^[1.45]、鉄塔が雷撃を受けやすい状況にある。特に、日本海沿岸で発生する大きなエネルギーを有する冬季雷は雲底が低いため、高構造物に雷撃が集中しやすいことが知られており、このような地域では通信鉄塔への雷撃時の逆流雷により、配電線および周辺の需要家機器の雷被害が多数報告されている^[1.46]。

文献^[1.46]の調査結果では、調査を行った無線通信設備 59 箇所中 17 箇所で無線通信設備および周辺の設備（配電線や需要家機器）での雷被害が確認されている。図 1-19 に無線通信設備への雷撃に伴う配電線および需要家機器の雷被害事例の一例を示す。雷撃箇所と推定される無線通信設備から 300 m 程度離れた需要家設備まで、広範囲に雷被害が発生していることが確認できる。この事例

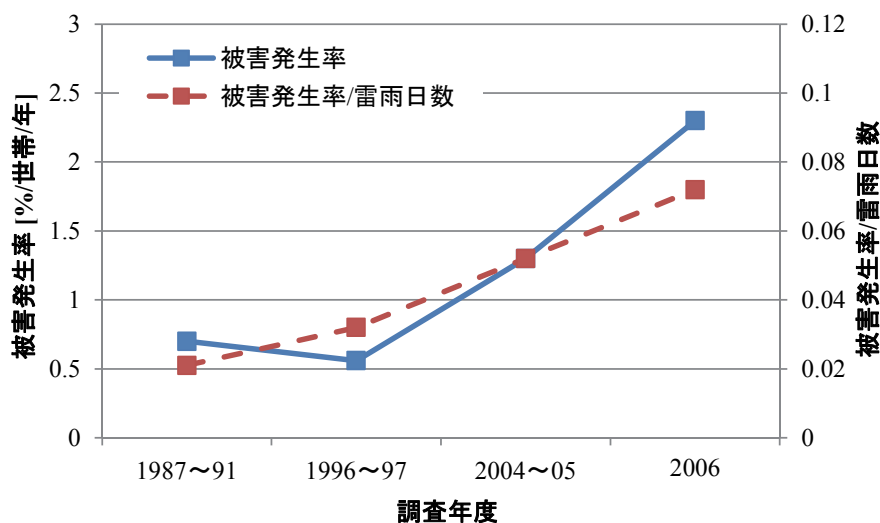


図 1-16 低圧需要家機器の雷被害発生率の推移^[1.8]

第1章 序論

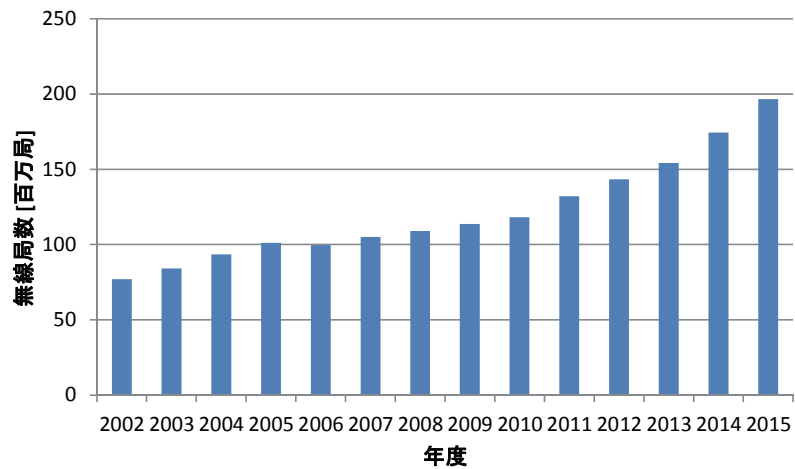


図 1-17 電気通信用無線通信設備数の推移^[1.44]

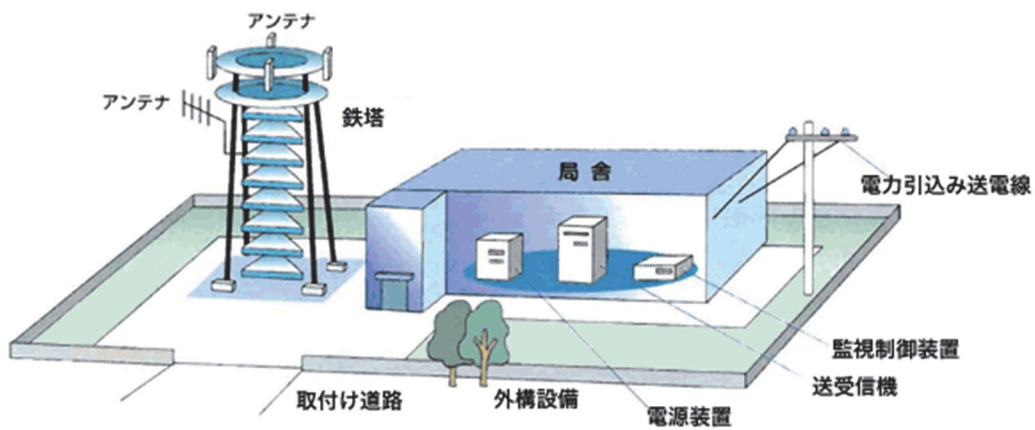


図 1-18 無線通信設備の構成例^[1.45]

からも分かるように、近年では、無線通信設備が住宅の近くにも多数、設置されるようになったため、無線通信設備自身の雷被害のみならず周辺の需要家機器にも雷被害が広範囲に拡大する可能性が高くなっている。

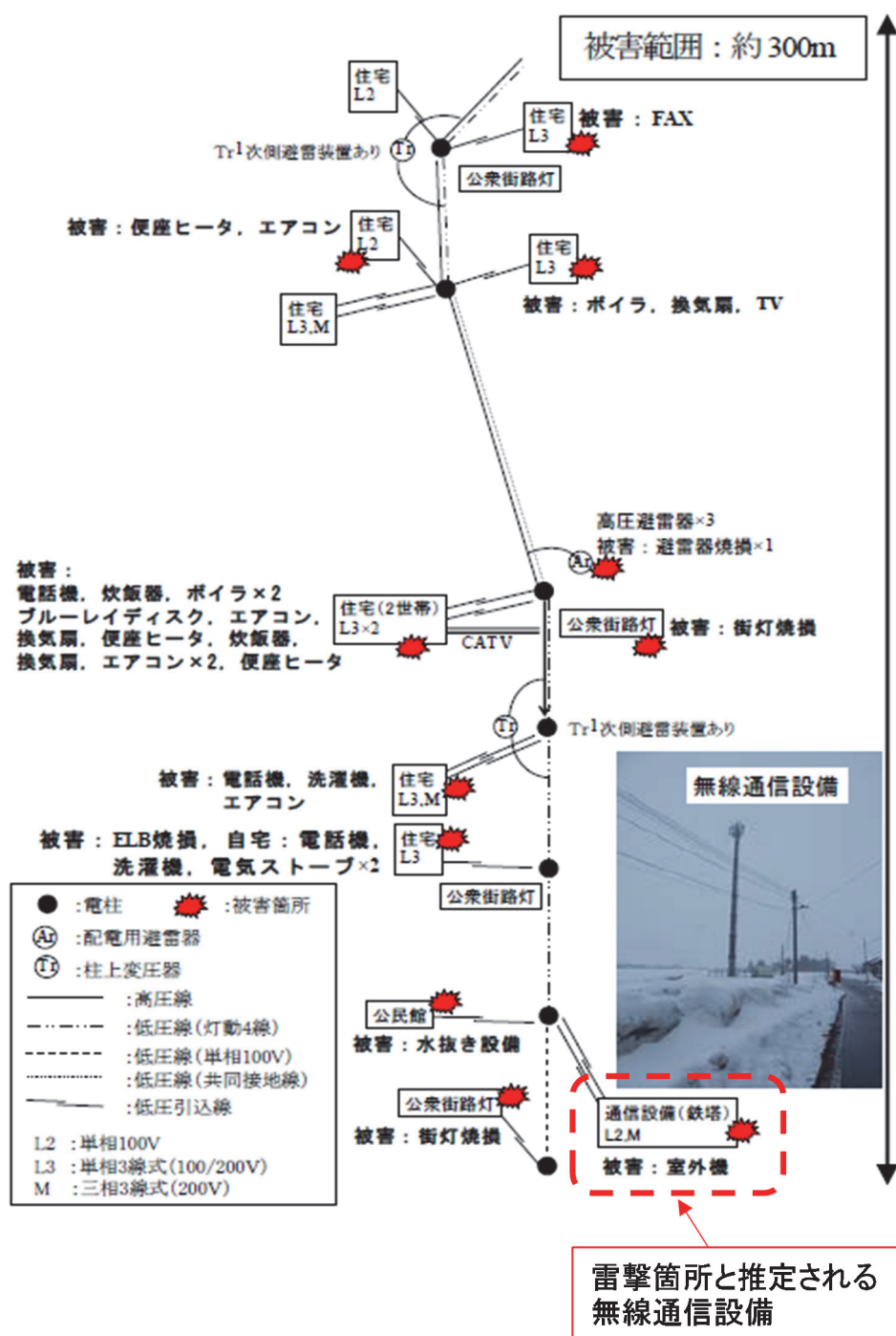


図 1-19 無線通信設備周辺の雷被害事例^[1.46]

1.5 配電線の雷害対策に関する研究課題

前節までに示した配電線の雷害対策研究の変遷や雷被害実態の調査結果を踏まえ、配電線の雷害対策に関する研究課題を以下に列挙する。

(1) 高圧配電線の雷害対策

高圧配電線の雷害対策手法は技術的には概ね確立しており、現在では、雷害対策に要する費用とその対策による雷被害低減割合を定量的に評した上で、最適な雷害対策手法を選定する段階となっている。しかしながら、これまでの雷害対策は、当該地域の落雷回数や過去の雷事故実績を参考にしながら経験則的に実施されることが多く、雷に対するリスクを定量的に評価しながら実施されることは少なかった。今後、効果的な雷害対策を進めていくためには、各地域の高圧配電線の雷に対するリスクを定量的に評価できる手法の開発が重要な課題となる。

(2) 低電圧で駆動する配電機器の雷害対策

電力系統の高度化に伴い、今後の配電線には低電圧で駆動する機器の導入がますます増加すると考えられる。特にスマートメータはその導入が加速しており、我が国においては 2014 年から 2024 年までの 10 年間の累計で 8000 万台以上の導入が予定されている^[1.47]。しかしながら、需要家機器の雷被害調査結果からも明らかなように、このような低電圧で駆動する機器は雷に対して脆弱である可能性が高い。このため、スマートメータに代表される低電圧で駆動する配電機器の雷害対策を確立することが重要な課題となっている。

(3) 無線通信設備から配電線および需要家機器への逆流雷対策

今後も通信エリアの拡大や通信速度の高速化に伴い、住宅近くに設置される無線通信設備の数の増加と、これに伴う、無線通信設備からの逆流雷被害の増加が懸念される。無線通信設備への雷撃時における、高圧配電線の逆流雷対策はこれまでも詳細に検討されてきているが、低圧配電線や周辺の需要家設備まで含めた対策については、これまで詳細に検討された例が殆ど無く、効果的な雷害対策手法を示すことが重要な課題となっている。

第1章 序論

1.6 本論文の構成

本論文では、前記の課題の解決を目的として、高压配電線から低压配電機器に至る各設備の雷被害の発生機構について明らかにするとともに、これに対するリスク評価を行う手法を構築した結果について述べる。本論文は図 1-20 に示す全 5 章から構成されており、各章の内容は以下のようになっている。

第 1 章（本章）では、配電線に発生する雷現象の概要について述べるとともに、これまでの配電線の雷害対策の研究の推移および雷事故実績の変遷について整理することにより、現在の配電線の雷害対策研究の課題を示す。

第 2 章では、雷性状や耐雷設備構成、配電線路密度、周辺構造物等の各地域の特性を考慮した上で、数値計算により高压配電線の雷リスク評価手法を提案するとともに、実際の配電設備データを用いて、雷事故実績と提案手法により求めた雷リスク評価結果を比較することにより、提案手法の妥当性を示す。

第 3 章では、近年急激に増加しつつある無線通信設備への雷撃時の周辺の配電線および需要家機器の雷被害低減に向けた各種雷害対策手法の効果について述べる。検討に当たっては、試験配電線を用いた実規模雷撃試験により、無線通信設備雷撃時の雷サージ発生様相を明らかにするとともに、電力系統瞬時値解析プログラムを用いた雷サージ解析をもとに提案する雷害対策の効果を定量

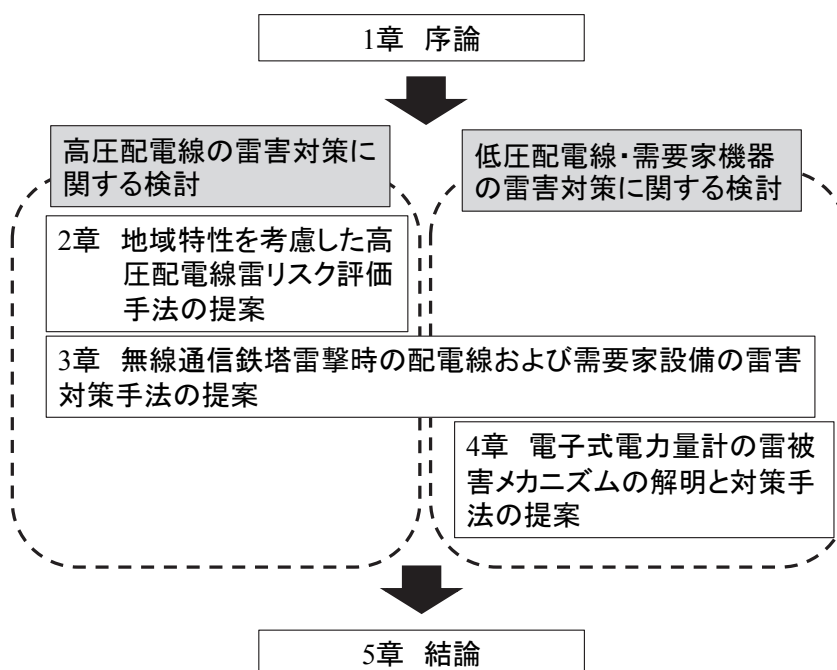


図 1-20 本論文の構成

第1章 序論

的に評価した。

第4章では、今後導入が加速するスマートメータの雷害対策に向けた基礎検討として、スマートメータと同様の原理で電力量を測定する電子式電力量計の、雷による故障メカニズムを明らかにするとともに、その対策手法について検討した結果について述べる。また、雷サージ解析をもとに電子式電力量計の雷故障率を算出する手法を提案した結果についても示す。

最後に第5章において、本研究で得られた成果をまとめることにより、配電線における効果的な雷害対策手法について示すとともに、今後の研究課題について述べる。

第 1 章の参考文献

- [1.1] スマートグリッド実現に向けた電力系統技術調査専門委員会：「スマートグリッドを支える電力システム技術」，電気学会 (2014)
- [1.2] 電気事業連合会：「電力統計情報」，<<http://www.fepc.or.jp/library/data/tokei/index.html>> (2017/5/15 アクセス)
- [1.3] 配電機材に対する劣化環境の定量評価専門委員会：「配電機材に対する劣化環境の定量評価」，電気協同研究，第 69 巻，第 3 号 (2013)
- [1.4] 耐雷設計基準委員会 配電分科会：「配電線耐雷設計基準要綱」，電力中央研究所 技術研究所報告，Vol. 13，No. 4 (1963)
- [1.5] 耐雷設計基準委員会 配電分科会：「配電線耐雷設計ガイドブック」，電力中央研究所報告 研究報告，175030 (1976)
- [1.6] 配電線雷害対策専門委員会：「配電線雷害対策」，電気協同研究，第 40 巻，第 6 号 (1985)
- [1.7] 耐雷設計委員会 配電分科会：「配電線耐雷設計ガイド」，電力中央研究所報告 総合報告，T69 (2002)
- [1.8] 細川武，横山茂，副田正裕：「家電機器の雷被害様相の変遷と今後の課題」，電気学会論文誌 B，Vol.129，No.8，pp.1033-1038 (2009)
- [1.9] 横山茂，谷口弘光：「第 3 の配電線雷害原因」，電気学会論文誌 B，Vol. 117，No. 10，pp. 1332-1335 (1997)
- [1.10] 横山茂，杉本仁志，和田勝，小出剛志，小菅努，中田一夫，浦田恒則：「山頂負荷供給配電線の雷害防止対策」，電力中央研究所報告 総合報告，T64 (2001)
- [1.11] 新藤孝敏，本山英器，三木貫，齋藤幹久，松枝昭頼，本間規泰，肥田知仁，新庄一雄，林清孝，栗津隼人，真壁勝久，藤川真人，栗原聡史，佐藤正志：「日本の大地雷撃発生状況 ―電力各社の落雷位置標定システムのデータに基づく，2009 年度から 2013 年度までの雷データ取りまとめ結果―」，電気学会高電圧研究会資料，HV-16-032 (2016)
- [1.12] 横山茂：「配電線誘導雷現象の解析とその実証」，電力中央研究所報告 総合報告，123 (1986)
- [1.13] 諸岡泰成，横山茂，浅川聡：「架空地線と避雷器併用時の配電線誘導雷電圧抑制効果の検討」，電気学会論文誌 B，Vol. 112，No. 8，pp.711-719 (1992)
- [1.14] 宮崎輝・岡部成光・餐場潔・平井崇夫：「観測に基づく配電線雷サージの統計分析」，電気学会論文誌 B，Vol. 126，No. 1，pp. 97-104 (2006)
- [1.15] “Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”，

IEEE Std 1410-2010 (2010)

- [1.16] A. Borghetti, C. A. Nucci and M. Paolone, “An improved procedure for the assessment of overhead line indirect lightning performance and its comparison with the IEEE Std. 1410 method”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, pp. 684-692 (2007)
- [1.17] V. A. Rakov, F. Rachidi, “Overview of Recent Progress in Lightning Research and Lightning Protection”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 51, No. 3, pp.428-442 (2009)
- [1.18] A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci and F. Tossani, “Influence of the Return Stroke Current Waveform on the Lightning Performance of Distribution Lines”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, TPWRD-01844-2015 (2016)
- [1.19] S. Yokoyama and A. Asakawa: “Experimental study of response of power distribution lines to direct lightning hits”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 4, No. 4, pp. 2242-2248 (1989)
- [1.20] 浅川聡, 横田勤, 橋本洋助, 中田一夫:「配電線直撃雷応答特性に及ぼす雷電流波頭長の影響」, 電力中央研究所報告 研究報告, T94064 (1995)
- [1.21] 浅川聡, 橋本洋助, 横山茂:「雷による配電線フラッシュオーバー発生率算定手法の開発」, 電気学会学論文誌 B, Vol. 114, No. 10, pp. 1050-1058 (1994)
- [1.22] K. Nakada, T. Yokota, S. Yokoyama, A. Asakawa, M. Nakamura, H. Taniguchi and A. Hashimoto, “Energy Absorption of Surge Arresters on Power Distribution lines due to Direct Lightning Strokes – Effect of an Overhead Ground Wire and Installation Position of Surge Arresters-”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 12, No. 4, pp. 1779-1785 (1997)
- [1.23] 横山茂:「配電線の直撃雷対策」, 電気学会学論文誌 B, Vol. 114, No. 6, pp. 564-568 (1994)
- [1.24] 谷口弘光, 浅川聡, 横山茂, 中田一夫, 大西賢治, 本林敏功:「配電線 1 相の避雷器省略時の耐雷効果の検討」, 電気学会学論文誌 B, Vol. 114, No. 11, pp. 1150-1059 (1994)
- [1.25] 浅岡由伸, 浅川聡, 横山茂, 中田一夫, 杉本仁志:「単相配電線路における耐雷ホーン 1 相省略方法の検討」, 電気学会学論文誌 B, Vol. 125, No. 5, pp. 537-543 (2005)
- [1.26] 松浦進, 森松達, 浅岡由伸, 石本和之:「配電用避雷器の 1 相省略による雷保護効果の検討」, 電気学会学論文誌 B, Vol. 136, No. 5, pp. 106-113 (2016)
- [1.27] A. Asakawa, S. Yokoyama and M. Sakae, “Development of Analysis Method for the Flashover Rate Due to Lightning on Power Distribution Lines in Consideration of Cost Performance”, *IEEE Trans. PE*, Vol. 121, No. 11, pp. 1553-1559 (2001)
- [1.28] 高橋明久, 日高哲也, 石本和之, 浅川聡:「高圧配電用避雷器の接地抵抗値が直撃雷保護効果

- に与える影響」, 電気学会学論文誌 B, Vol. 131, No. 5, pp. 472-480 (2011)
- [1.29] T. Shindo, H. Matsubara, T. Suda and T. Miki, “Development of a Lightning Risk Assessment Program (LIRAP)”, *IEEJ Trans. PE*, Vol. 132, No. 8, pp. 747-753 (2012)
- [1.30] A. Takahashi, A. Asakawa, S. Yokoyama, S. Marumoto, K. Yamamoto and S. Nakamoto, “Outage Rates of Power Distribution Lines due to Summer and Winter Lightning in Chugoku Region”, *IEEJ Trans. PE*, Vol. 129, No. 10, pp. 1201-1206 (2009)
- [1.31] 杉本仁志, 島崎克彦:「北陸地方の配電線雷故障の季節的および地域的特徴」, 電気学会学論文誌 B, Vol. 132, No. 1, pp. 102-108 (2012)
- [1.32] 佐藤智之, 本田秀樹, 本間規泰, 横山茂, 松本聡:「東北地方の季節特性を考慮した配電線雷ハザードマップの検討」, 電気学会高電圧研究会資料, HV-11-067 (2011)
- [1.33] A. Asakawa, S. Kuramoto and J. Kato, “Experimental Study of Lightning Surge Aspect for the Circuit Mounted Distribution and Telecommunication and Customer Systems: Aspect of Lightning Current According to Grounding System of Customer Equipment”, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, Vol. 5, No. 1, pp. 27-33 (2010)
- [1.34] S. Sekioka, K. Aiba, T. Miyazaki and S. Okabe, “Lightning Overvoltages in Low-Voltage Circuit for Various Lightning Striking Points”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 25, No. 4, pp. 3095-3014 (2010)
- [1.35] T. Miyazaki, T. Ishii and S. Okabe, “A Field Study of Lightning Phenomena on Low-Voltage Distribution Lines Including Residences”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 26, No. 1 (2011)
- [1.36] A. Borghetti, A. S. Morched, F. Napolitano, C. A. Nucci and M. Paolone, “Lightning-induced overvoltages transferred from medium-voltage to low-voltage networks”, *Proc. of IEEE Power Tech 2005*, pp. 1-7 (2005)
- [1.37] A. DeCarlo, V. A. Rakov, J. E. Jerauld, G. H. Schnetzer, J. Schoene, M. A. Uman, K. J. Rambo, V. Kodali, D. M. Jordan, G. Maxwell, S. Humeniuk and M. Morgan, “Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building –Part I: Triggered- lightning experiments”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 23, No. 4, pp. 2439-2446 (2008)
- [1.38] P. Wang, L. Li and V. A. Rakov, “Calculation of Current Distribution in the Lightning Protective System of a Residential House”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 50, No. 2, 7005404 (2014)
- [1.39] 資源エネルギー庁公益事業部技術課:「電気事業統計」, 昭和 60 年度～平成 7 年度
- [1.40] 資源エネルギー庁公益事業部電力技術課:「電気事業統計」, 平成 8 年度～平成 10 年度
- [1.41] 原子力安全・保安院電力安全課:「電気保安統計」, 平成 11 年度～平成 14 年度
-

第 1 章 序論

- [1.42] 電気事業連合会工務部編：「電気保安統計」，平成 15 年度～平成 27 年度
- [1.43] 内田進牛，荒木薫，加來勲，櫻庭幸哉，竹科隆夫，白川晋吾：「配電線用柱上変圧器内蔵の耐雷素子の適用と評価」，電気学会論文誌 B，Vol. 116，No. 11，pp. 1382-1387 (1996)
- [1.44] 総務省：「情報通信統計データベース」，<<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/>> (2016/8/15 アクセス)
- [1.45] 総務省：「無線システム普及支援事業」，<<http://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/siensaku/tiiki/musensystem-hukyusien.html>> (2016/8/15 アクセス)
- [1.46] 深山康弘：「携帯基地局，無線通信設備の雷保護」，電気設備学会誌，Vol. 35，No. 2，pp. 111-114 (2015)
- [1.47] スマートメーター制度検討会 第 15 回資料：「スマートメーターの導入促進に伴う課題と対応について」，<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004668/pdf/015_03_00.pdf> (2016/5/5 アクセス)

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

2.1 はじめに

我が国において、高圧配電線の雷害対策は過去数十年にわたって研究が行われており、この結果から、適切な対策を実施することによって、誘導雷による事故は防げること、また直撃雷に関してもある程度のレベルについては保護可能であることが明らかとなっている^[2.1]。このため、近年の高圧配電線の雷害対策は直撃雷を対象としたものが中心となり、実験および解析的検討が多く行われている。

一方、近年の電力設備の雷害対策は、対策に必要とされるコストと、その対策による効果の両面を考慮した効果的かつ効率的な対策を実施することが強く求められている。このような状況を踏まえ、「雷リスクマネジメント」の観点から、電力流通設備の雷害対策を検討することが提唱されている^[2.2]。雷リスクマネジメントとは、図2-1に示すように「雷ハザード評価」、「雷リスク評価」、「雷リスクマネジメント」の3段階で構成される。雷リスクマネジメントの概念を高圧配電線に適用したとき、それぞれの段階で実施される内容は以下のようになる。

(1) 雷ハザード評価

高圧配電線における雷ハザード評価とは、落雷回数や雷性状を考慮した当該エリアの雷の厳しさを評価することを示す。例えば、落雷回数が2倍になれば、雷ハザード値も2倍になる

(2) 雷リスク評価

雷リスク評価とは、(1)で求まる雷ハザードに対して、対象設備で生じる雷被害の大きさや発生

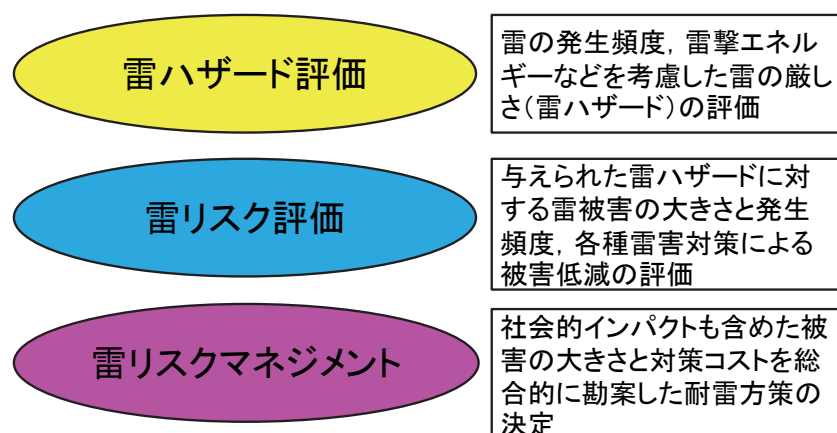


図2-1 雷リスクマネジメントの概念^[2.2]

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

頻度を評価することを示す。これを高圧配電線に適用した場合には、当該地域の雷ハザードに加え、耐雷設備構成や単位面積当たりの高圧配電線互長（以下、高圧配電線密度と記す）等の配電設備の状況および周辺の構造物等の影響を考慮した上で、高圧配電線の雷事故の発生頻度を算出することとなる。このため、雷ハザード値が同じ、つまり雷の厳しさが同じであったとしても、その地域の雷害対策が異なれば高圧配電線の雷リスク値も異なることとなる。

(3) 雷リスクマネジメント

雷リスク評価結果をもとに、リスクが高い地域では雷害対策を密に、リスクが低い地域では若干疎にすることを検討するステップとなる。これを配電設備に置き換えて考えると、リスクが高い地域では、避雷器の取付け間隔を短くすることや架空地線と避雷器の併用を行うこととなり、リスクが低い地域では架空地線の撤去等の対策を実施することが挙げられる。この際には、雷害対策に要するコストを考慮することも重要となる。

電力流通設備の中でも、配電設備は面的に施設され、その数も膨大であることから、費用対効果という観点から考えた場合に、上記の雷リスクマネジメントの考え方が比較的馴染みやすい設備であると考えられる。実際に多くの電気事業者も、図 2-2 に示す、各地域の年間雷雨日数を表す IKL

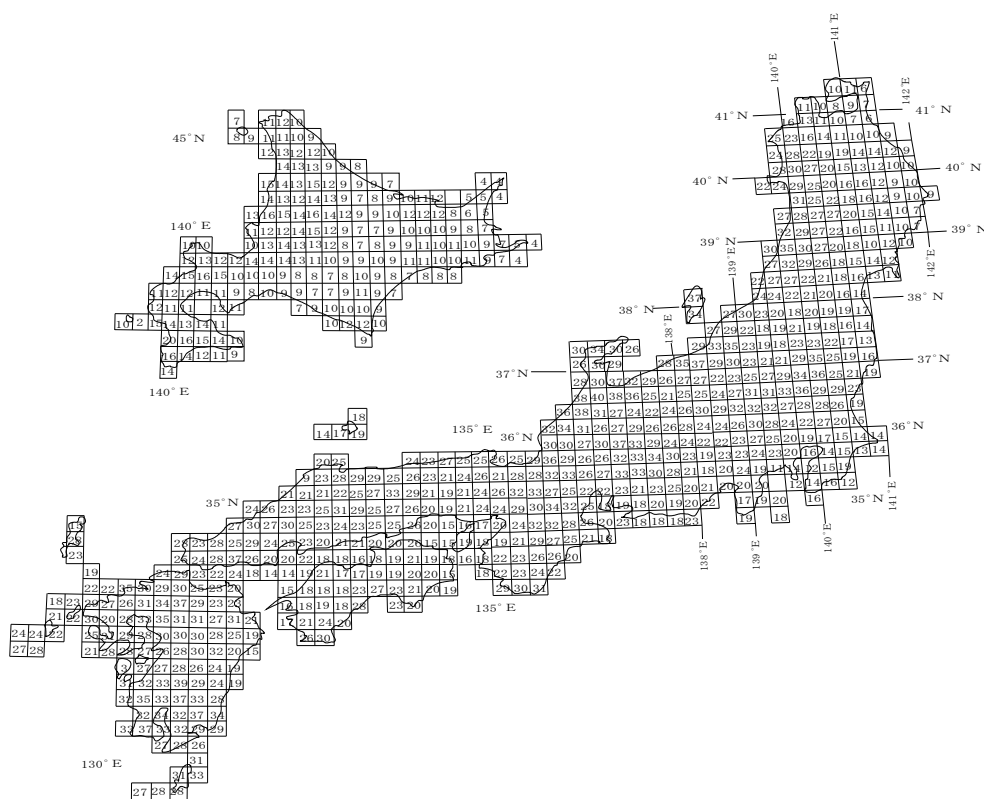
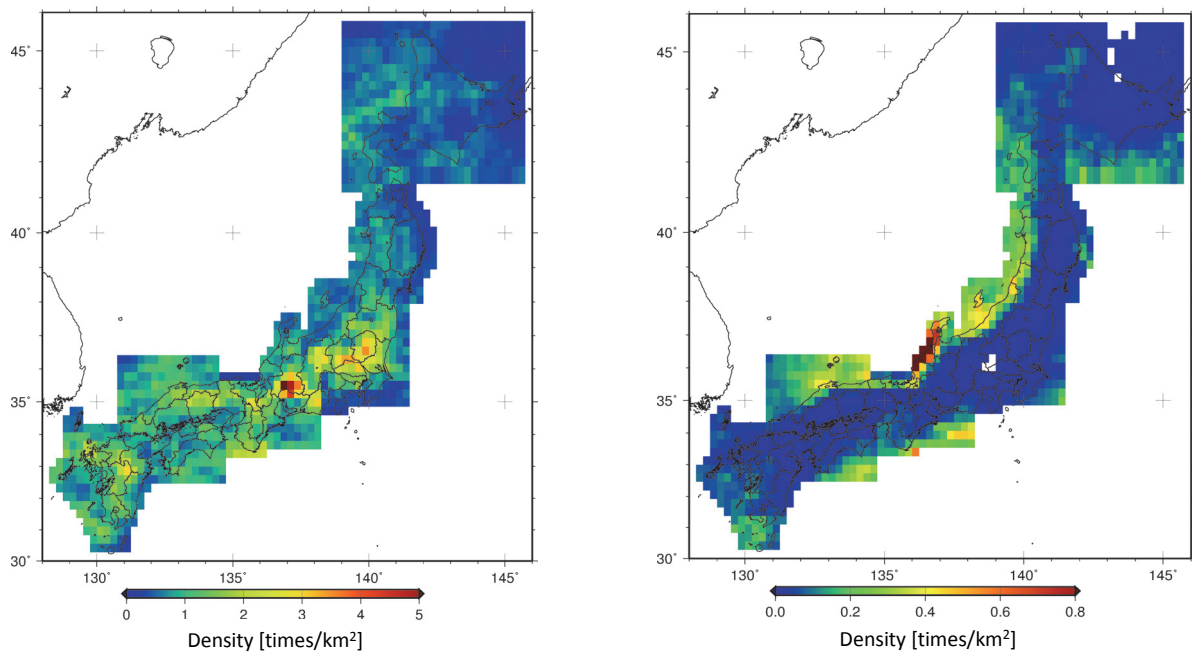


図 2-2 年間雷雨日数マップ (IKL マップ)
(昭和 29 年度から昭和 38 年度の 10 年平均) [2.1]

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

(Isokeraunic Level) マップをもとに、年間雷雨日数に応じて管内の雷害対策区分を決定するなど^[2.3]、雷ハザード評価の観点からの対策は、精度は荒いものの既の実施されてきたとも言える。さらに、近年では落雷位置標定システムのデータを用いて、図2-3のような精緻な落雷頻度マップが作成され^[2.4]、このデータを用いた詳細な事故実態の分析が精力的に行われている^{[2.5]~[2.7]}。この結果、図2-4に示すように、夏季の雷では雷過電圧に起因する電線やがいしの被害の割合が大きく、冬季の雷では雷電流のエネルギーに起因する避雷器の被害の割合が大きくなるなど、地域や季節により高圧



(a) 夏季（4月から10月まで）

(b) 冬季（11月から3月まで）

図2-3 落雷位置標定システムにより作成した落雷密度マップ^[2.4]

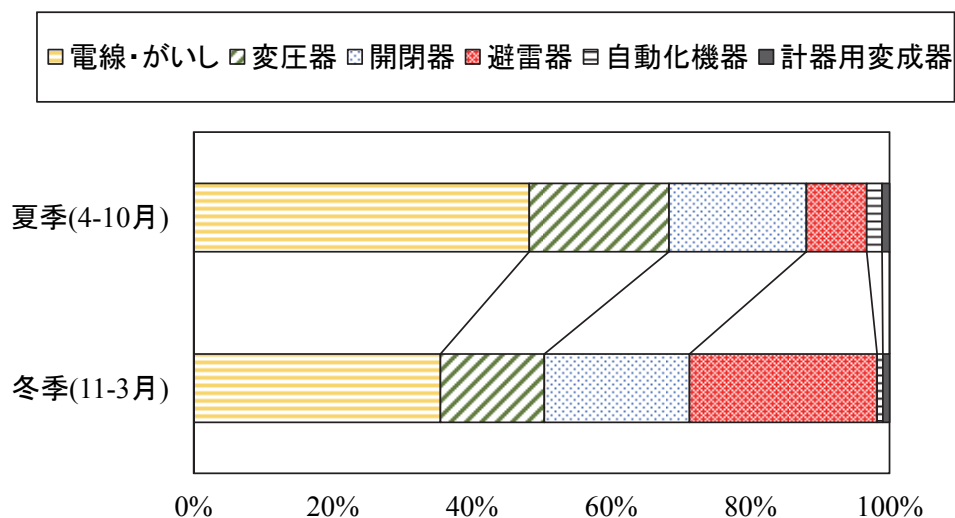


図2-4 夏季と冬季における雷故障機材割合の違い^[2.3]

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

配電線の雷に対するリスクが大きく異なることが明らかとなっている。

これらの雷被害の実態分析結果は、現状の雷害対策の効果を検証し、雷に対するリスクの高い地域を明らかにするには極めて有効である。一方で、過去の分析結果のみからは、雷被害低減のために現状の設備に対して追加の雷害対策を実施した際の雷事故低減効果を予測するのは難しく、新たな雷害対策の効果の検証のためには、数値計算により雷害対策前後における雷事故発生率の変化を正確に予測することが必要となる。

これまでも数値計算をもとにした、高圧配電線のフラッシュオーバー発生率^{[2.8]-[2.11]}や避雷器焼損率^[2.12]等の雷事故発生率の推定は多数実施されているものの、これらは評価を行う地域の雷性状や配電線の密度を一定と仮定した上での検討が殆どであり、計算により求められた雷事故率は実際の雷被害実績に比べ10倍程度大きくなっているなど、精度の向上が求められていた^[2.13]。図2-3から分かるように地域毎に落雷回数や雷性状は大きく異なる他、配電線の密度や配電線の周辺状況も一定ではない。落雷回数が多い地域や、配電線密度が高い地域では、雷事故の発生数は多くなる可能性が高いため、合理的な害対策の検討のためには、このような地域毎の詳細な特性を考慮した上で雷に対するリスクが高い地域を明らかにすることが重要となる。

上記を受けて、本章では高圧配電線の合理的な雷害対策手法の確立を目的として、落雷頻度や配電線の密度、配電線周辺の構造物の考慮といった地域毎の特性を考慮した高圧配電線の雷リスクを評価する手法を構築した内容について述べる。本章では、最初に従来から実施されてきた高圧配電線雷事故率計算手法の概要および問題点について整理した後、これらの問題点の解決手法を示すことにより高圧配電線雷リスク評価手法を構築した内容について述べる。最後に、本論文で提案する雷リスク評価手法を実際の配電設備データに適用することにより、提案手法の妥当性を検証した結果について示す。

2.2 従来の高圧配電線雷事故発生率算定手法の概要

本節では、雷リスク評価手法の概要に先立ち、従来から実施されてきた高圧配電線雷事故発生率算定手法の概要および本手法による計算結果を示す。図 2-5 に本手法における雷事故発生率の計算フローを示す。本手法はモンテカルロシミュレーションにより、「単位面積当りに年間で発生する雷事故件数」を算出するものである。以下に計算手法の詳細について述べる。

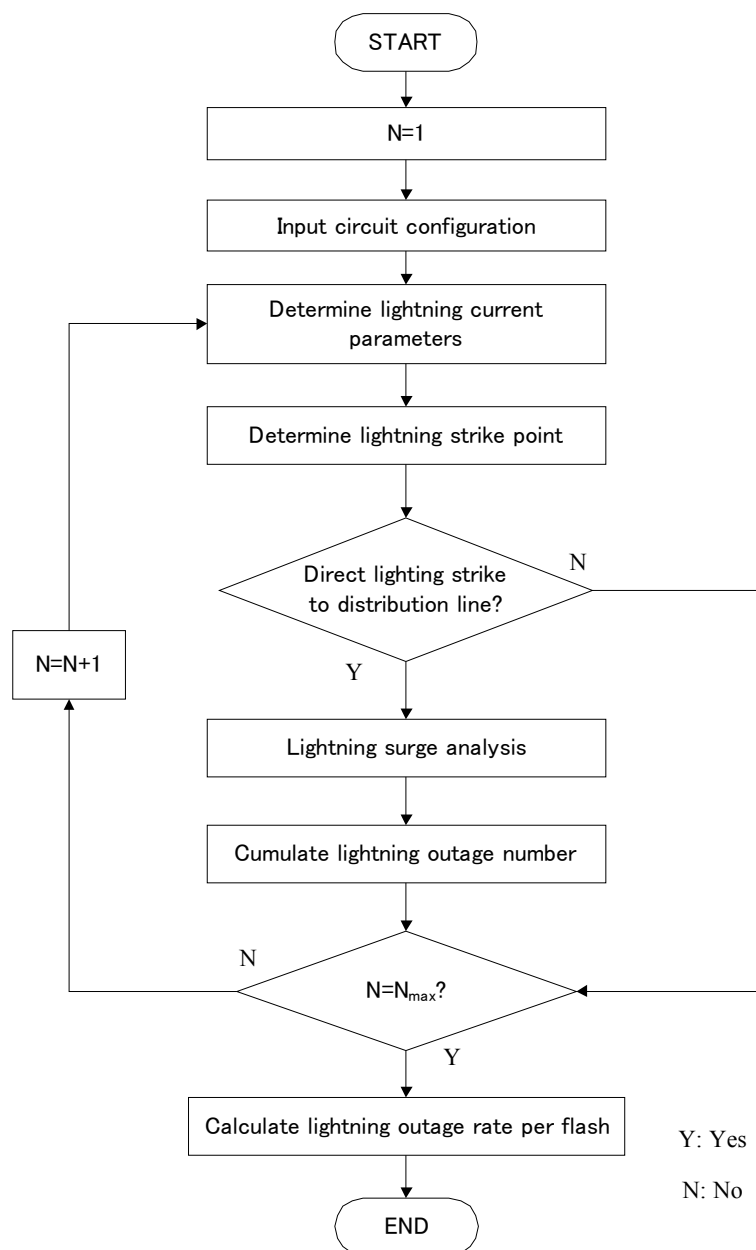


図 2-5 従来の高圧配電線雷事故率計算のフロー

2.2.1 直撃雷に対する高圧配電線雷サージ解析モデルの構築

本手法では、図 2-6 のように $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ の面積に、 50 m の径間長毎に計 21 本のコンクリート柱が直線上に並ぶ亘長 1 km の高圧配電線一回線を仮定し、この高圧配電線の雷事故を計算する。1 章でも述べたように、現在の日本の配電設備構成では誘導雷による事故は殆ど発生しない状況となっており^{[2.14],[2.15]}、直撃雷による雷事故を正確に評価することが重要となる。このため、本計算では、高圧配電線に雷が直撃した際の雷サージの発生様相を評価できるモデルを電力系統瞬時値解析プログラム XTAP^[2.16]上に構築する。図 2-7 に XTAP 上に構築した雷サージ解析モデルの概要を、表 2-1 に本モデルに適用した各パラメータの値を示す。

高圧配電線へ雷が直撃した場合には、架空地線や高圧配電線の相導体の他、相導体下方に架線される通信線を支持するための吊り線（以下、メッセンジャワイヤと記す）にも雷電流が分流し、相導体と腕金間に発生する雷過電圧（以下、がいし間電圧と記す）が低下する^[2.17]。このため、今回の計算でもこの現象を再現するため、図 2-7(b)に示すように、架空地線、相導体および通信線のメッセンジャワイヤをモデル化し、線路の末端では雷サージの反射を防ぐため、各導体に整合抵抗を接続し終端した。

また、コンクリート柱には、接地線が沿わせて施設されており、高圧配電線に雷が直撃した場合には、コンクリート柱の鉄筋と接地線の間で絶縁破壊が発生し、電氣的に接続された状態となることから^[2.18]、今回の計算ではコンクリート柱と接地線を併せてサージインピーダンス $250\ \Omega$ の単相分布定数線路で模擬した^[2.19]。また、これらのコンクリート柱のうち、避雷器が取り付けられている柱では相導体と腕金間に図 2-8 に示す特性の非線形抵抗を取付けた。

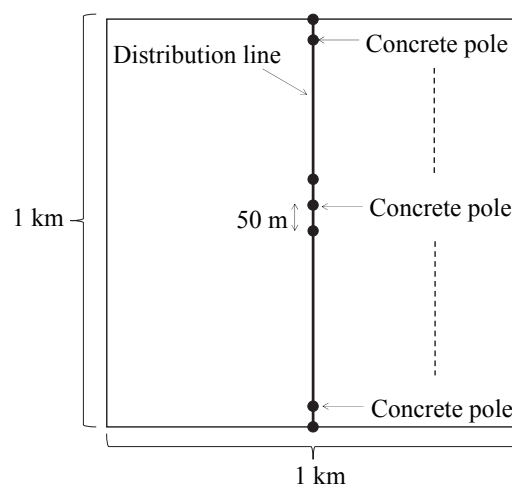
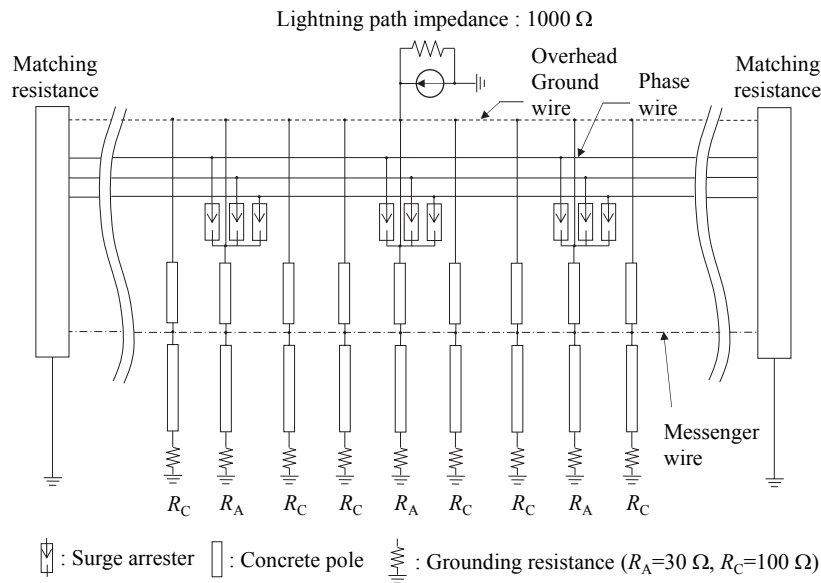
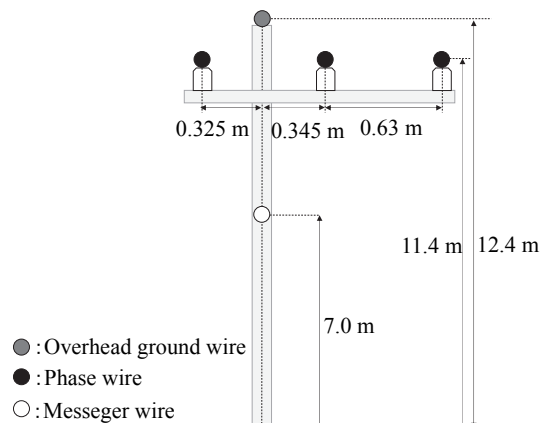


図 2-6 モンテカルロシミュレーションにおける配電線路構成



(a) 雷サージ解析モデルの概要



(b) 導体配置

図 2-7 XTAP 上に構築した高圧配電線雷サージ解析モデル

2.2.2 高圧配電線が雷事故に至る条件

本手法では、雷撃時に発生するがいし間電圧によるがいしのフラッシュオーバ、もしくは避雷器を通過する雷電流のエネルギーによる避雷器の焼損により雷事故が発生すると仮定した。本論文では、それぞれの故障モードに対する閾値を以下のように決定した。

(I) がいしのフラッシュオーバ電圧

高圧配電線は径間長が数 10 m 程度と短いため、雷が直撃した際には、相導体上を進行する雷サージ電圧が、各コンクリート柱に設けられた避雷器や架空地線の接地極で反射することにより、高圧相導体と腕金間に発生するがいし間電圧波形の波尾長が、標準雷インパルス電圧に比べ極めて短

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

表 2-1 雷サージ解析モデルに適用したパラメータ

Current waveform	Triangular waveform
Lightning path impedance	1000 Ω
Span length	50 m
Overhead ground wire (OGW)	Steel wire, cross section: 22mm ²
Phase wire	XLPE-insulated Aluminum wire, cross section: 25 mm ²
Messenger wire	Steel wire, cross section: 22mm ²
Ground resistivity	100 Ω m
Surge impedance of concrete pole: Z_{cp}	250 Ω
Grounding resistance of concrete pole: R_c	100 Ω
Grounding resistance of GW	Shared with grounding resistance of surge arresters
Grounding resistance of surge arrester: R_A	30 Ω
Discharge voltage of surge arrester	29 kV
Energy capability of surge arrester	15kJ
Flashover voltage of insulator	200kV

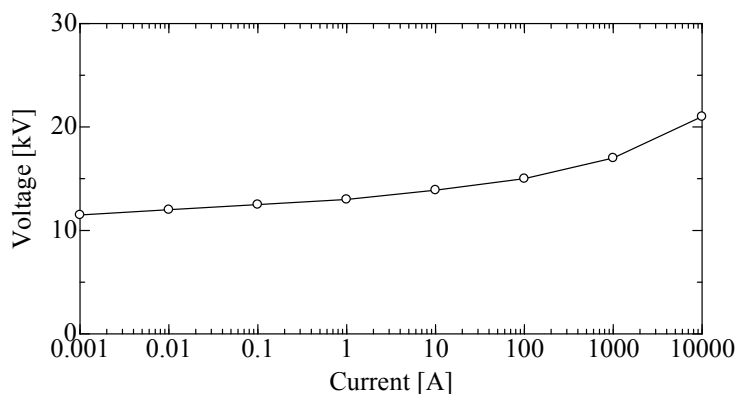


図 2-8 避雷器の $V-I$ 特性

くなることがよく知られている^[2,20]。このような条件下においては、がいしの 50%フラッシュオーバー電圧値が標準雷インパルス電圧波形に比べ上昇するため、雷事故率計算を行う際には、波尾長が極めて短い雷インパルス電圧波形に対する配電用がいしのフラッシュオーバー特性からフラッシュオーバー電圧を決定する必要がある。このため、本研究では図 2-9 に示す試験回路において、がいし間電圧波形を模擬した短波尾雷インパルス電圧波形における配電用がいしの 50%フラッシュオーバー電圧を

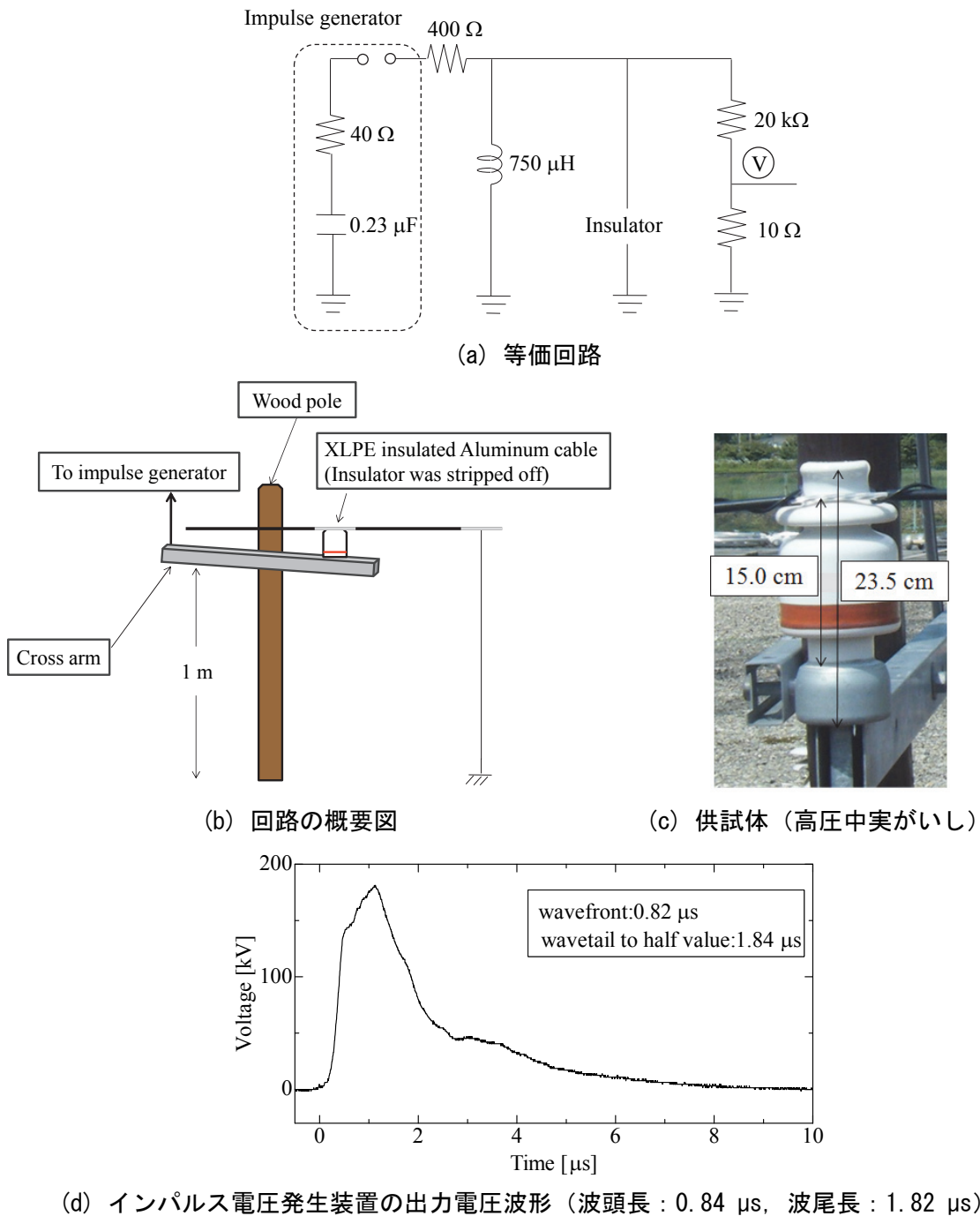


図 2-9 配電用がいしのフラッシュオーバー試験回路

推定し，この結果から，雷事故率計算におけるがいしのフラッシュオーバー電圧を決定した。なお，フラッシュオーバー電圧は大気状態によって変化するため，実験時の大気状態を標準大気状態に補正するのが一般である。短波尾雷インパルス電圧の補正方法については，有効な手法が確立されていないが，標準雷インパルス電圧における結果との比較のため，本論文では JEC-0202 に示される大気補

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

正手法^[2.21]に従い、標準大気状態への補正を行っている。本試験における周囲環境条件は以下の通りである。なお、相対空気密度とは、20℃、1気圧の標準状態を基準とした時の空気密度の比を示す値である。

実験時期：夏季

気温：25.1～32.0℃（平均：29.6℃）

気圧：958.5～962.7 hPa（平均：961.2 hPa）

相対空気密度：0.912～0.925（平均：0.917）

湿度：17.32～20.83 g/m³（平均：19.46 g/m³）

図 2-10 に印加電圧極性を変化させたときのフラッシュオーバー電圧と時間の関係（以下、 V - t 特性と記す）を示す。同図から分かるように、いずれの極性の V - t 特性もほぼ一致している。これは、 V - t 特性が印加電圧極性で明確に変化し、負極性の方が大きくなるという標準雷インパルス電圧^[2.22]での結果とは異なっている。また、表 2-2 に 40 回の昇降法により求めた 50 %フラッシュオーバー（以下、

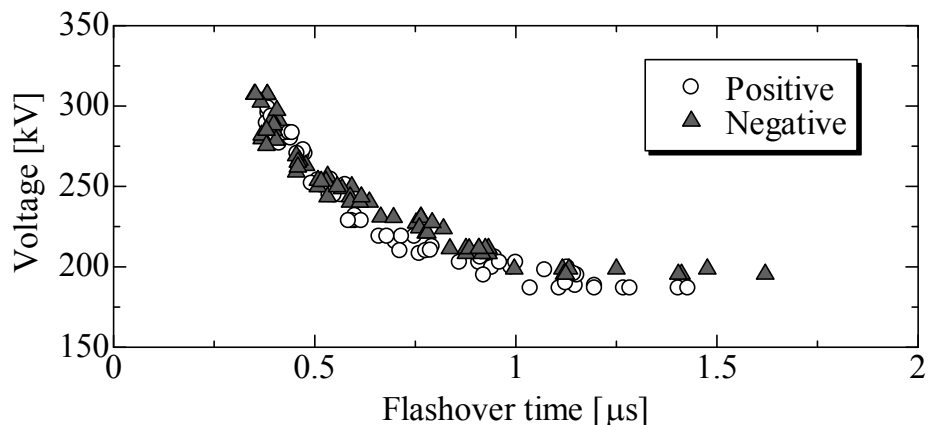


図 2-10 短波尾雷インパルス電圧波形における高圧中実がいしの V - t 特性

表 2-2 高圧中実がいしの V_{50} の推定結果

Applied voltage	Short wavetail impulse		Standard lightning impulse ^[2.22]	
Polarity	(+)	(-)	(+)	(-)
50 % flashover voltage V_{50} [kV]	196.9	201.8	147.4	174.2
Standard deviation σ [kV]	4.12	4.02	4.88	6.98
σ / V_{50} [%]	2.09	1.99	3.31	4.01

V_{50} と記す)と標準偏差 σ を示す。また、ここでは比較として、標準雷インパルス電圧における結果^[2.22]もあわせて示す。試験結果から、今回実験を行った短波尾雷インパルス電圧におけるがいしの V_{50} は概ね200 kV程度であると推定される。これは供試体とした高圧中実がいしの雷インパルス耐電圧値の約2倍、標準雷インパルス電圧における V_{50} の約1.3倍となっている。また、V-t特性と同様、短波尾雷インパルス電圧波形の場合、 V_{50} も印加電圧極性による違いは少ない。これらの特性は異なる形状のがいしにおける結果^{[2.23]-[2.25]}とも一致しており、短波尾雷インパルス電圧波形では、フラッシュオーバーが発生する時間領域が0.4～2 μ s程度までと短いため、放電に比較的ばらつきが少ないためであると考えられる。以上の結果から、今回の計算ではがいしのフラッシュオーバー電圧は正負いずれの極性においても200 kVに設定した。

(II) 避雷器の焼損エネルギー

避雷器は通過する雷電流のエネルギーが一定値を超えると、内部の酸化亜鉛素子が焼損し、故障に至る。文献[2.19]において、避雷器の焼損に関する詳細な研究がなされており、その結果では、高圧配電線で一般的に用いられている定格2.5 kAの避雷器は、内部の酸化亜鉛素子が処理するエネルギーが15 kJを超えた段階で故障が発生するとされている。このため、今回の計算においても、酸化亜鉛素子を模擬した非線形抵抗に発生するエネルギーが15 kJを超えた段階で避雷器が焼損するものとした。

2.2.3 モンテカルロシミュレーションによる雷事故発生率の推定

前項で構築した高圧配電線雷サージ解析モデルに対して、雷パラメータや雷撃箇所を変化させた多数回計算を行うことにより、図 2-6 の配置の高圧配電線における雷事故発生率を計算する。

図 2-3 から分かるように、全国大で見た場合には、夏季の落雷回数は冬季に比べ 10 倍以上多く、また、雷事故件数も夏季の方が多いことから^[2.3]、今回の計算では夏季の雷を対象とした雷事故発生率計算を行うこととした。表 2-3 に今回の計算で用いた雷電流パラメータの累積頻度分布を示す。これらの雷パラメータは主に夏季に多い負極性の下向き雷の雷電流パラメータであり、波高値 I に関しては文献[2.1]で推奨している雷撃電流頻度分布、波頭長 T_f と波尾長 T_t に関しては、池田らにより国内で観測されたデータ^[2.26]である。これらの雷パラメータに対してモンテカルロ法を適用することにより波高値 I [kA]、波頭長 T_f [μs]および波尾長 T_t [μs]を決定し、この値を図 2-11 に示す三角波電流源に適用することにより雷電流を模擬した。

次に、図 2-6 の 1.0 km 四方の検討エリア内において、モンテカルロシミュレーションにより落雷点の座標を決定し、先に決定した雷電流パラメータを有する落雷が高圧配電線へ直撃するかどうかを図 2-12 で表される電気幾何学モデル^[2.27]により判定する。このモデルでは、それぞれの雷撃吸引距離 r [m]は、雷電流波高値 I [kA]が大きくなるほど大きくなると仮定されており、

表 2-3 計算に用いた夏季雷を想定した雷電流パラメータ（対数正規分布）

Item	50 %	16 %	$\sigma_{\log I}$
Crest value I [kA]	26	55	0.225
Wavefront value T_f [μs]	2.5	5.2	0.182
Wavetail value T_t [μs]	40	59	0.168

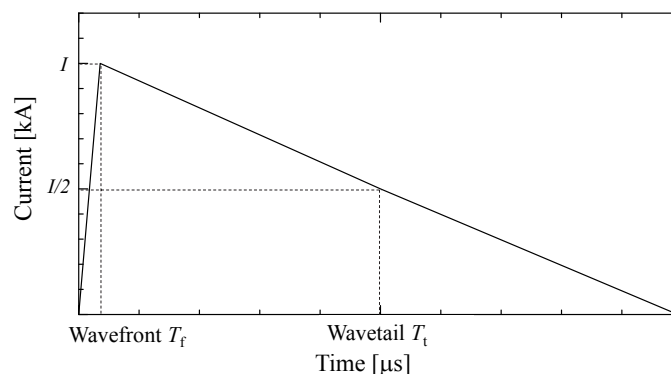


図 2-11 雷サージ解析に用いた電流波形（三角波）

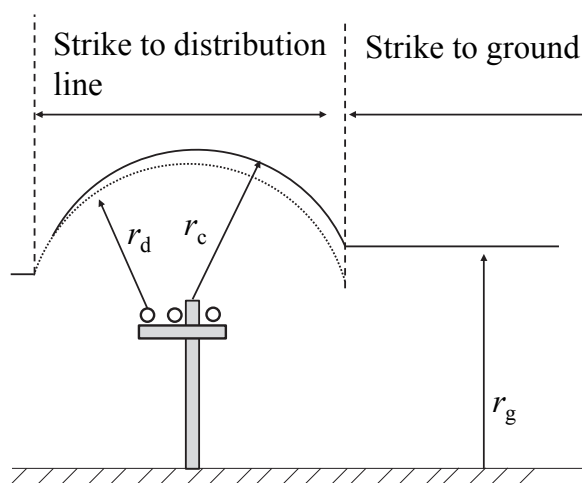


図 2-12 配電線への雷撃を決定するための電気幾何学モデル

$$r = A \times I^B \quad (2.1)$$

で表される。ここで A および B はモデル毎で異なる定数である。

今回の検討では、高圧配電線への雷撃箇所はコンクリート柱の柱頭および相導体の経間中央のいずれかとし、コンクリート柱の雷撃吸引距離 r_c 、相導体の雷撃吸引距離 r_d および大地の雷撃吸引距離 r_g はすべて等しいと仮定し、 A および B は、文献[2.28]に基づき $A=8$ 、 $B=0.65$ とした。なお、今回の計算では雷放電路は大地に対して垂直に伸びると仮定している。

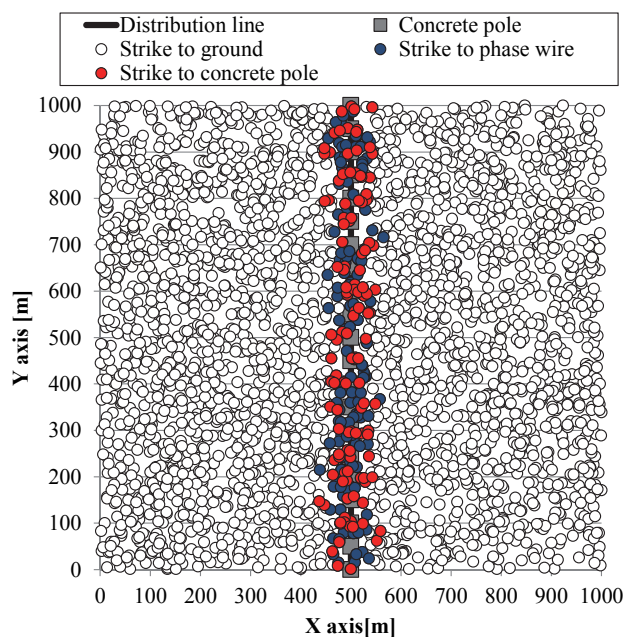
上記の仮定の下、モンテカルロシミュレーションにおける計算回数 N を 3000 回とした場合の高圧配電線への直撃雷発生率を算出した結果を図 2-13 に示す。同図から分かるように、高圧配電線の周辺に構造物が無い場合には、1 回の落雷で高圧配電線に雷が直撃する確率は約 8.0 %程度であることが分かる。

このようにして高圧配電線へ直撃すると判定された雷については、XTAP による雷サージ解析により雷事故の有無を判定する。この手順を繰り返すことにより、雷事故が発生した回数 K を累積することによって、最終的に雷事故発生率 P_o は以下の式で与えられる。

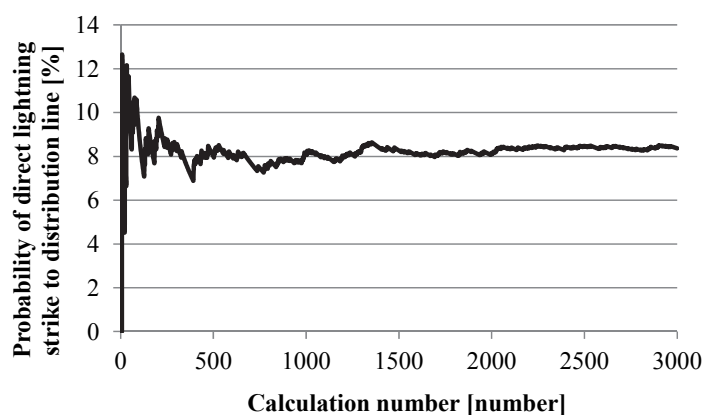
$$P_o = \frac{K}{N} \times GFD \quad (2.2)$$

ここで、 P_o ：単位面積当りの雷事故発生率 [回/(km²・年)]、 K ：モンテカルロシミュレーションにおける雷事故発生件数 [回]、 N ：モンテカルロシミュレーションにおける計算回数 [回]、 GFD ：当該地域の落雷密度 [回/(km²・年)]である。

なお、日本の高圧配電線は非接地系統であるため地絡電流が小さく、高圧相導体の 1 相のみでフラッシュオーバーが発生した場合には、アークが自然消弧し事故には至らない場合が殆どであるため^[2.29]、今回の計算では高圧相導体 2 相以上でのフラッシュオーバーもしくは避雷器の焼損が起こった場



(a) 雷撃箇所の分布



(b) 高圧配電線への直撃雷発生率

図 2-13 モンテカルロ法を用いた高圧配電線への直撃雷発生割合の算定結果

合を雷事故と判定した。

(2.2)式で、 $GFD=1$ とした場合の結果が、1 落雷当りの雷事故発生率となり、地域特性等を考慮していない場合の結果となる。図 2-14 に $GFD=1$ の時の雷事故発生率の計算結果を示す。同図から分かるように、避雷器の取付け間隔が短くなると、フラッシュオーバーに起因する雷事故の減少により全体としての雷事故率は減少するものの、避雷器焼損が発生する確率が上昇している。また、架空地線の有無に着目すると、架空地線が架線された方がフラッシュオーバー発生率および避雷器焼損率のいずれも低くなっていることが分かる。

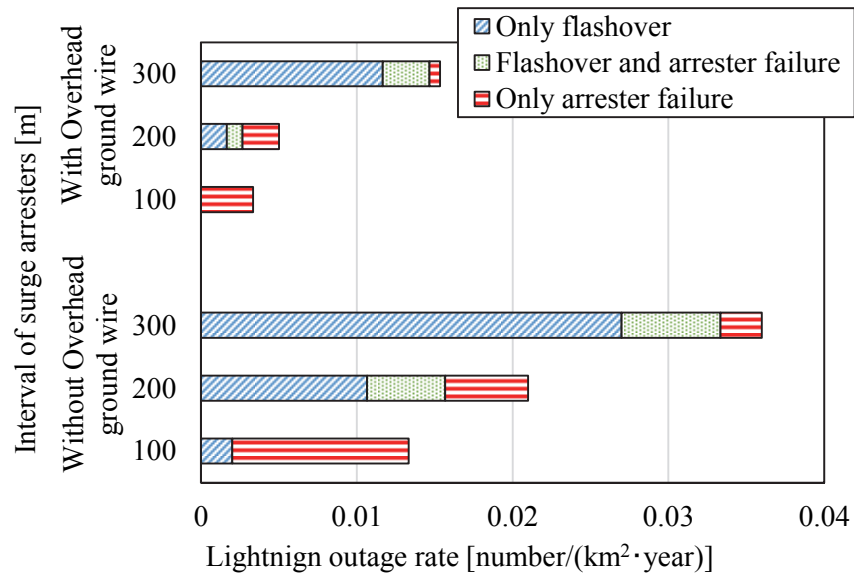


図 2-14 雷事故発生率の計算結果 ($GFD=1$ の場合)

2.3 本論文で提案する雷リスク評価手法の概要

前節で示した高圧配電線雷事故率計算により架空地線や避雷器といった耐雷機材の取り付けによる雷事故発生率の低減効果が評価できる。しかしながら、これらの計算結果には、当該地域の落雷回数や単位面積当りの高圧配電線密度、高圧配電線周辺の構造物による雷遮蔽効果等の影響が考慮されていない。これらの要素は高圧配電線に雷が直撃する確率に大きな影響を与えるため、地域特性を考慮した雷リスク評価のためには、これらの影響を考慮する係数を算出し、(2.3)式に示すように前節で求めた雷事故発生率に P_0 に対して乗算する必要がある。

$$\begin{aligned} R_L &= P_0 \times \frac{k(L)}{k(1)} \times \alpha \\ &= \frac{N}{K} \times GFD \times \frac{k(L)}{k(1)} \times \alpha \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、 R_L ：各地域の特性を考慮した高圧配電線雷事故発生率（以下、雷リスク値と記す）[回/(km²・年)]、 K ：モンテカルロシミュレーションにおける雷事故発生件数 [回]、 N ：モンテカルロシミュレーションにおける計算回数 [回]、 GFD ：当該地域の年間落雷密度 [回/(km²・年)]、 $k(L)$ ：高圧配電線密度 L [km/km²]の地域における配電線への直撃雷発生率 [%]、 $k(1)$ ：高圧配電線密度 1 [km/km²]の地域における高圧配電線への直撃雷発生率 [%]、 α ：高圧配電線周辺の構造物の雷遮蔽効果を示す係数、である。

上記のパラメータのうち、 K および N の算出方法は既に2.2節で示したため、本節では残る GFD 、 $k(L)$ 、 $k(1)$ および α を電気事業者が保有するデータおよび国土地理院により一般に公開されているデータのみから導出する手法について述べる。

2.3.1 地域毎の大地雷撃密度の算出

各地域の年間落雷回数を示す大地雷撃密度は、電気事業者で運用している落雷位置標定システムにより得られたデータを用いた^[2.2]。落雷位置標定システムでは、1度の落雷（フラッシュ）中に含まれる全ての雷撃（ストローク）を検出する。今回の検討では、第一帰還雷撃から1秒以内、標定点から半径1 km 以内、雷撃が同極性のものを一つの落雷として各地域の大地雷撃密度を算出した。なお、これらの処理を行う際には、雲間放電を除外し、大地雷撃のみを解析対象とするため、雷電流の波高値が10 kA 以上のデータのみを用いた。

2.3.2 配電線密度の増加に伴う直撃雷発生率の上昇を補正する係数の算出

2.2 節では、単位面積当りの高圧配電線密度 L [km/km²]が1の条件において雷事故発生率の計算を行った。しかしながら、評価を行う地域の高圧配電線密度 L が増加すれば、当然ながら高圧配電

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

線へ雷が直撃する確率 $k(L)$ [%] は増加する。また、高圧配電線密度が増加すると、図 2-13 に示すような線路分岐の存在により、配電線への雷撃吸引範囲の重なりが発生するようになるため、この影響を考慮することも必要となる。先行研究^[2.9]では、これらの影響を考慮するため、図 2-14 に示すように高圧配電線密度毎の代表線路形状を仮定して、高圧配電線密度と直撃雷発生率の関係を算出

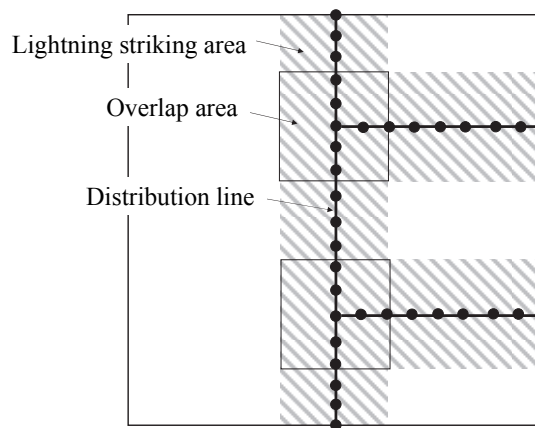


図 2-13 線路の分岐による雷撃吸引範囲の重なり例

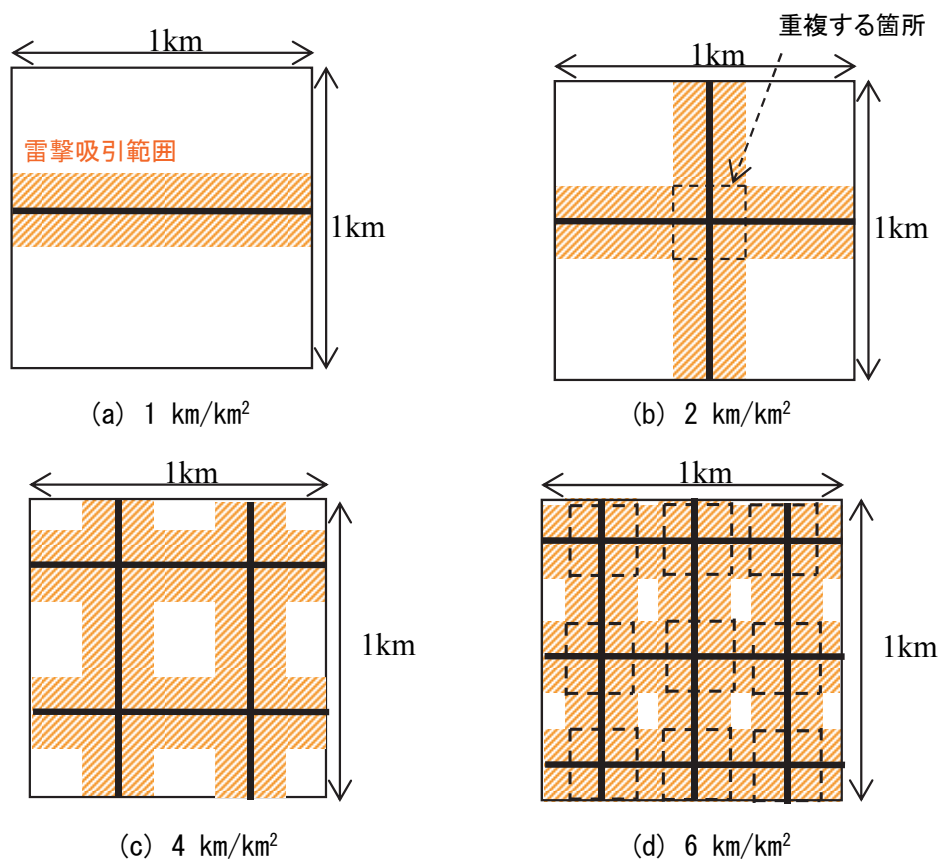


図 2-14 先行研究における高圧配電線密度と線路分岐の取り扱い^[2.9]

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

していた。しかしながら、高圧配電線の形状は地域毎に異なるため、この手法では線路の分岐の影響を正しく評価できない。このため、本論文では、雷リスク評価を行う地域をいくつかのメッシュに分割し、各メッシュ内のコンクリート柱の緯度経度情報から、図 2-15 に示すように高圧配電線の形状を再現し、これに対してモンテカルロシミュレーションを実施することにより高圧配電線への直撃雷発生率 $k(L)$ を算出した。図 2-16 に本手法により計算した、メッシュ毎の配電線密度と配電線への直撃雷発生率の関係を示す。同図から、高圧配電線密度が高い地域における直撃雷発生率は本論文で提案する手法の方が先行研究による手法よりも低くなっていることが分かる。このようにして求めた $k(L)$ と図 2-12 の配置における直撃雷発生率 $k(1)$ の比から、各地域の配電線路密度毎の直撃雷発生率の補正係数を正しく求めることが可能となる。

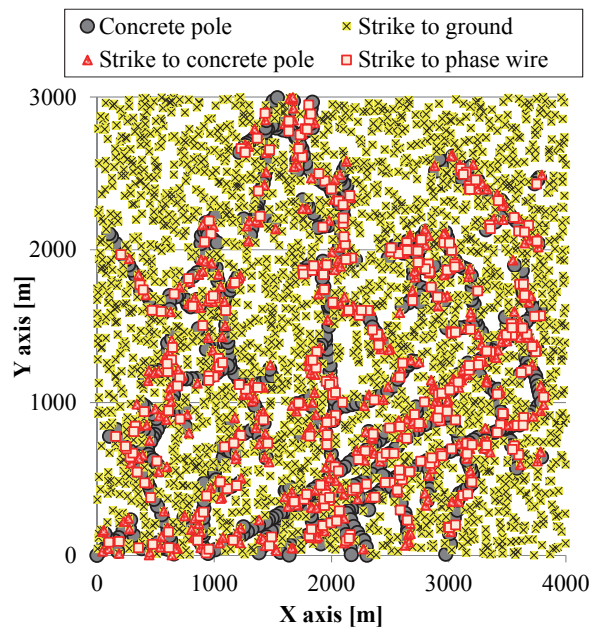


図 2-15 コンクリート柱の位置情報を考慮した雷撃箇所の分布の計算例

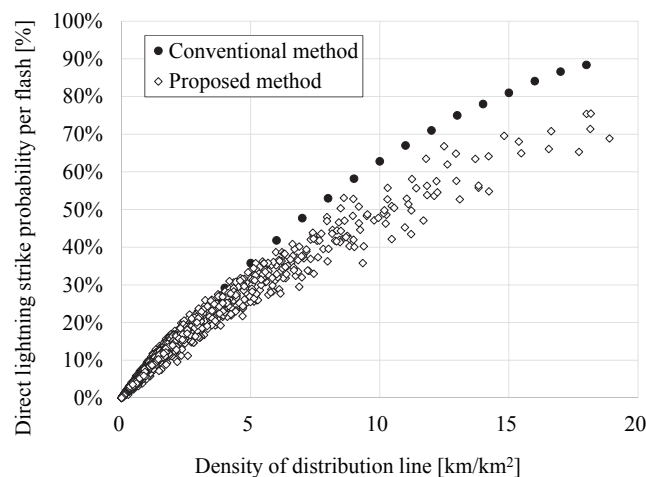


図 2-16 高圧配電線密度 L と直撃雷発生率 $k(L)$ の関係

2.3.3 配電線周辺の構造物による雷遮蔽効果を補正する係数の算出

2.2 節の計算では、高圧配電線の周辺には構造物は存在しないという前提で計算を実施している。しかしながら、実際には高圧配電線の周辺には多くの構造物が存在する場合が多く、これらの雷遮蔽効果により高圧配電線に雷が直撃する頻度が低下すると考えられる。このため、本論文では、国土地理院が公開する土地利用区分データ^[2,30]を用いて、それぞれの地域における配電線周辺の「高層建物」および「森林地域」の分布を把握し、これらの雷遮蔽効果を評価する。

まず、ビル等の高構造物が高圧配電線周囲に存在するエリアについて考える。国土交通省の区分では、「高層建物」地域は、「住宅地・市街地等で建物が密集しているところで商業・業務用ビル、4 階建て以上のマンションが存在する地域」と定義されており、このような地域では高圧配電線に雷が直撃する確率は極めて低いと考えられる。このため、「高層建物」地域においては $\alpha=0$ とし、雷が配電線に直撃しないこととした。

一方で、「森林地区」では、樹木は高圧配電線と同等程度の高さであることが多いことや、樹木の導電率が高圧配電線に比べてそれほど高くはなく、完全な導体とは見なせないことなどの理由により、雷遮蔽効果の厳密な算出は難しい。このため、本論文では、図 2-17 に示すように、「森林地区」と「それ以外の地域」の雷事故率を比較することにより、樹木の雷遮蔽効果を算出した。なお、この比較を行う際には、地域毎に異なる高圧配電線の亘長や大地雷撃密度の影響を排除するために、雷事故件数を各地域の高圧配電線の亘長および落雷密度で除すことにより雷事故率を算出した。

同図から分かるように、避雷器の施設率が同一の場合には「森林地区」の雷事故率は「それ以外の地域」の雷事故率の約半分となっている。このことから、「森林地区」においては、 $\alpha=0.5$ とし、高圧配電線に雷が直撃する確率が半分となると仮定した。

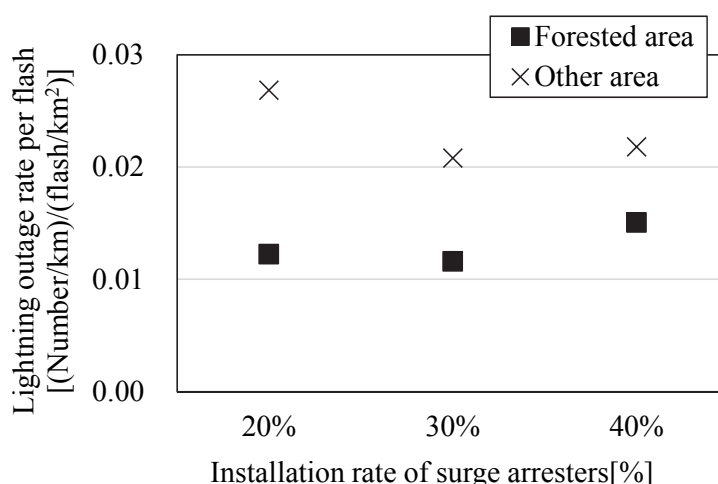


図 2-17 森林地区とそれ以外の地区の 1 落雷当りの雷事故実績の比較

2.4 提案手法を用いた実配電設備における雷リスク評価例

本節では、提案手法に実際の配電設備データを適用し、高圧配電線の雷リスク評価を行った例について示す。図 2-18 および表 2-4 に評価を行う地域を幾つかのメッシュに分割した際の落雷密度、高圧配電線密度、架空地線施設率および避雷器施設率の分布を示す。これらの設備データを以下に再掲する(2.3)式に適用することにより、地域毎の雷リスク値を算出する。

$$R_L = \frac{K}{N} \times GFD \times \frac{k(L)}{k(1)} \times \alpha \quad (2.3)$$

ここで R_L : 当該地域の高圧配電線の雷リスク値 [回/($\text{km}^2 \cdot \text{年}$)], N : モンテカルロシミュレーションにおける計算回数 [回], K : モンテカルロシミュレーションのうち雷事故が発生した回数 [回], GFD : 落雷位置標定システムによって得られた落雷密度 [回/($\text{km}^2 \cdot \text{年}$)], $k(L)$: 高圧配電線密度 L [km/km^2]の地域における高圧配電線への直撃雷発生率 [%], $k(1)$: 高圧配電線密度 1 [km/km^2]の地域

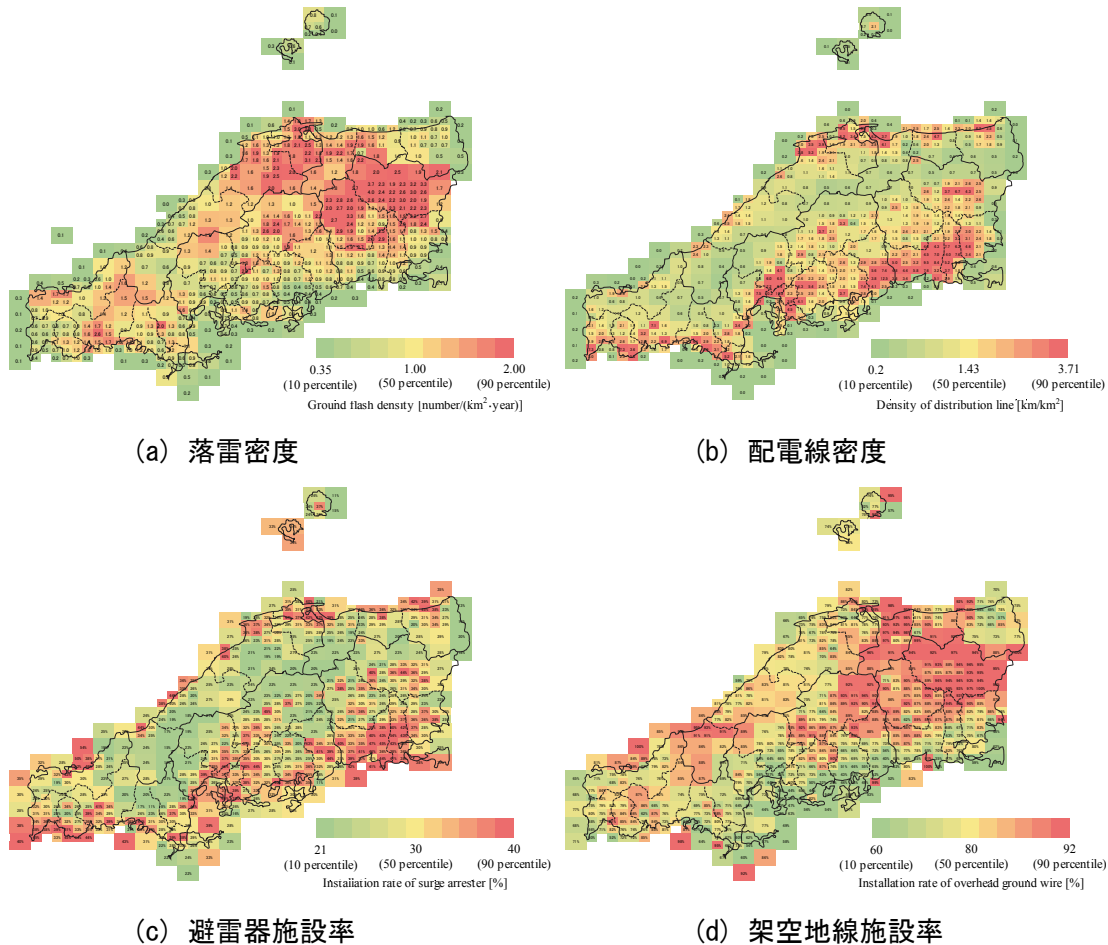


図 2-18 評価地域における各種データの分布

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

表 2-4 評価地域における各種データの平均値および中央値

	Ground flash density [times/km ²]	Distribution line density [km/km ²]	Installation rate of surge arrester [%]	Installation rate of overhead ground wire [%]
Average value	1.1	1.87	29.7	77.4
Median value	1.0	1.42	20.2	79.8

における高圧配電線への直撃雷発生率 [%], α : 高圧配電線の周辺の構造物の雷遮蔽効果を考慮した補正係数であり, 2.2 節および 2.3 節での検討結果から,

$$k(1) = 0.08$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{(高層建物地域)} \\ 0.5 & \text{(森林地域)} \\ 1 & \text{(それ以外の地域)} \end{cases}$$

となる。

また, 今回のモンテカルロシミュレーションでは, 図 2-12 に示すように架空地線施設率が 0 % もしくは 100 % の時の雷事故しか計算できないため, 以下の式を用いて, 各地域の架空地線施設率に応じた雷事故発生回数 K を算出した。

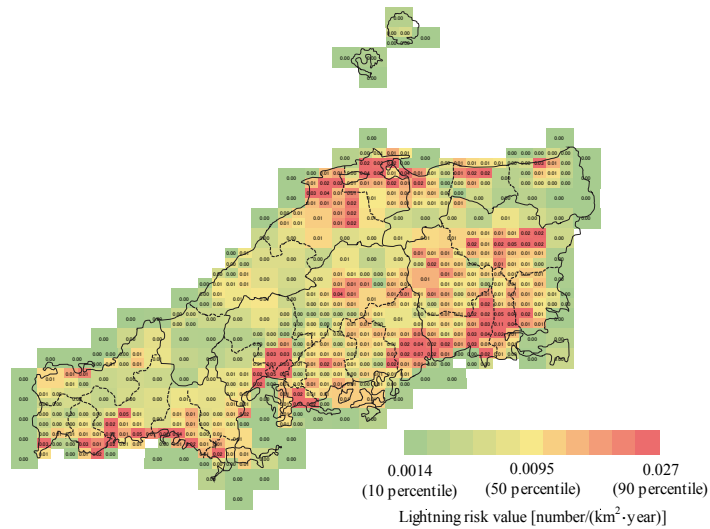
$$K = K_{OGW} \times \frac{D}{100} + K_{NOGW} \times \frac{100 - D}{100} \quad (2.4)$$

ここで, D : 架空地線の施設率 [%], K_{OGW} : 架空地線があるケースにおいて, モンテカルロシミュレーションで雷事故が発生した回数 [回], K_{NOGW} : 架空地線がないケースにおいて, モンテカルロシミュレーションで雷事故が発生した回数 [回]である。

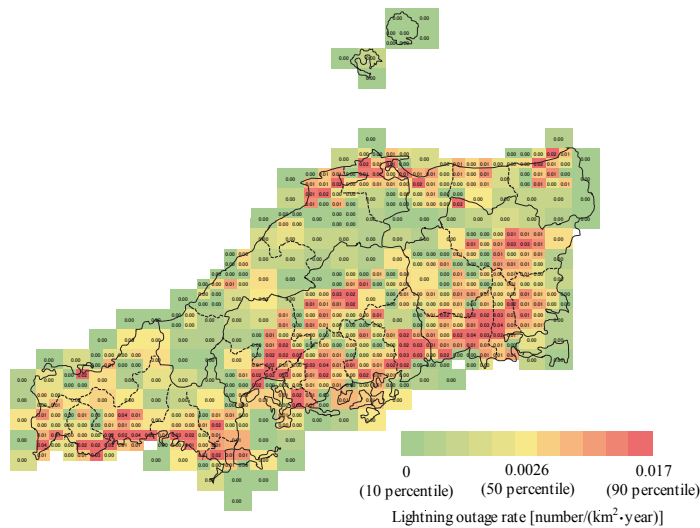
これらのデータおよび国土地理院の土地利用区分データを用いて, 雷リスク評価を行った結果を図 2-19 に, それぞれの平均値および計算結果と雷事故実績の相関係数を表 2-5 に示す。なお, 表 2-5 には, 参考までに従来の雷事故率計算手法を用いて計算した結果についても示している。

同表から分かるように, 従来手法では, 計算値が実際の雷実績値に比べ 2.4 倍程度大きくなっていたのに対して, 提案手法ではその差が 1.4 倍にまで縮まっている。また, 計算値と実績値の間の相関係数についても 0.685 から 0.715 へと改善しており, 両者の間には比較的強い相関があると判断できる。このことから, 本論文で提案する手法を用いることにより, 雷に対するリスクの高い地域を定量的に評価可能であることが分かった。

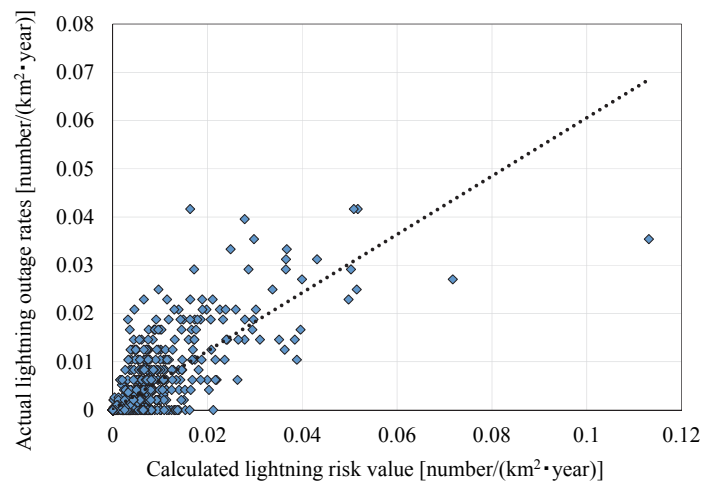
第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案



(a) 提案手法により作成した雷リスクマップ



(b) 実際の雷事故分布マップ



(c) メッシュ毎の雷リスク値と雷事故実績の比較

図 2-19 提案手法により求めた雷リスク値と実際の雷事故実績の比較

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

表 2-5 計算により求めた雷リスク値と実際の雷事故実績の平均値および両者の相関係数

	Conventional method	Proposed method
Average of calculated lightning risk value [times/(km ² ・year)]	0.0139	0.0083
Average of actual lightning outage value [times/(km ² ・year)]	0.0058	
Correlation coefficient	0.685	0.715

2.5 第2章のまとめ

本章では、電気事業者社が保有する落雷密度データおよび配電設備データに加え、国土地理院により一般に公開されている土地利用区分データを用いることにより、地域毎の特性（雷性状や耐雷設備構成、高圧配電線密度や周辺構造物の有無）を考慮した上で、高圧配電線の雷リスク評価を行う手法を提案した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 高圧配電線における雷事故発生率を低減するためには、避雷器の施設間隔を短くすることや、避雷器と架空地線を併用することが効果的である。
- (2) 落雷密度や高圧配電線密度、高圧配電線周辺の構造物といった地域毎の特性を考慮することにより求めた雷リスク評価結果は、実際の雷事故実績を良く再現しており、本論文で提案する雷リスク評価手法の妥当性が確認できた。

従来の高圧配電線の雷に対するリスク分析は、落雷回数や過去の雷事故実績等の経験則に基づいたものが多かったが、本論文で提案する手法を用いることにより、単位面積当りの雷事故発生率を示す「雷リスク値」という定量的な指標での評価が可能となった。文献[2.31]では、本論文で提案する雷リスク評価手法を用いて、中国地方において雷事故件数を一定割合低減するために必要な雷害対策手法とそれに要するコストの試算が既に実施されている。今後、本手法を全国に展開することにより、地域毎の雷害対策の効果を明らかにできるとともに、各地域の特性に合わせた合理的な雷害対策を実施することが可能となる。

なお、本章では、提案手法によって直撃雷に対する雷事故発生率をどの程度正確に予測可能であるかを検証するために、直撃雷が雷害対策の主対象であり、かつ検討に必要なデータが整っている、国内の高圧配電線のみを対象として検討を行った。今後、諸外国においても、架空地線や避雷器等の耐雷設備の取付けが拡充し、雷害対策の主対象が誘導雷から直撃雷へと変われば、提案手法を用いた高精度な雷事故の予測が可能になると考えられる。

第2章の参考文献

- [2.1] 耐雷設計委員会 配電分科会：「配電線耐雷設計ガイド」，電力中央研究所報告 総合報告，T69 (2002)
- [2.2] 新藤孝敏，須田知孝：「雷リスクマネージメントの基本的考え方」，電力中央研究所報告 研究報告，H06008 (2007)
- [2.3] 配電機材に対する劣化環境の定量評価専門委員会：「配電機材に対する劣化環境の定量評価専門委員会」，電気協同研究報告，第69巻，第2号 (2012)
- [2.4] 新藤孝敏，本山英器，三木貫，齋藤幹久，松枝昭頼，本間規泰，肥田知仁，新庄一雄，林清孝，栗津隼人，真壁勝久，藤川真人，栗原聡史，佐藤正志：「日本の大地雷撃発生状況 ―電力各社の落雷位置標定システムのデータに基づく，2009年度から2012年度までの雷データ取りまとめ結果―」，電気学会高電圧研究会資料，HV-16-022 (2016)
- [2.5] A. Takahashi, A. Asakawa, S. Yokoyama, S. Marumoto, K. Yamamoto and S. Nakamoto, “Outage Rates of Power Distribution Lines due to Summer and Winter Lightning in Chugoku Region”, *IEEE Trans. PE*, Vol. 129, No. 10, pp.1201-1206 (2009)
- [2.6] 杉本仁志，島崎克彦：「北陸地方の配電線雷故障の季節的および地域的特徴」，電気学会論文誌 B, Vol. 122, No. 1, pp. 102-108 (2012)
- [2.7] 佐藤智之，本田秀樹，本間規泰，横山茂，松本聡：「東北地方の季節特性を考慮した配電線雷ハザードマップの検討」，電気学会高電圧研究会資料，HV-11-067 (2011)
- [2.8] 浅川聡，橋本洋助，横山茂：「雷による配電線フラッシュオーバー発生率算定手法の開発」，電気学会学論文誌 B, Vol. 114, No. 10, pp. 1050-1058 (1994)
- [2.9] 宮崎輝，坂本芳樹，岡部成光，森健次郎，吉永淳，本橋準：「観測に基づく配電線雷事故率計算手法の開発」，電気学会論文誌論 B, Vol. 129, No. 7, pp. 905-912 (2009)
- [2.10] 道下幸志，酒井良太，中田英宏：「負極性直撃雷による配電線スパークオーバー率―電磁界観測により得られた波高値を用いた解析―」，電気学会論文誌論 B, Vol. 122, No. 11, pp. 922-927 (2012)
- [2.11] A. Borghetti, C. A. Nucci and M. Paolone, “Lightning performances of distribution lines: sensitivity to computational methods and to data”, *Proc. of 2001 IEEE PES Winter Meeting*, pp. 796-798 (2001)
- [2.12] 杉本仁志：「配電線下方に施設する架空地線の避雷器焼損の抑制効果」，電気学会論文誌 B, Vol. 120, No. 5, pp. 529-525 (2011)
- [2.13] 配電線雷事故率予測手法調査専門委員会：「配電線雷スパークオーバー発生率予測手法の現状と

第2章 地域特性を考慮した高圧配電線雷リスク評価手法の提案

今後の課題」, 電気学会技術報告, No. 997 (2003)

- [2.14] 宮崎輝・岡部成光・餐場潔・平井崇夫:「観測に基づく配電線雷サージの統計分析」, 電気学会論文誌 B, Vol. 126, No. 1, pp. 97-104 (2006)
- [2.15] 野田琢, 三木貫, 宜保直樹, 竹中清:「電力系統瞬時値解析プログラムの開発 (その 1) —基本設計—」, 電力中央研究所報告 研究報告, H06002 (2007)
- [2.16] K. Ishimoto, T. Kawazoe, T. Hidaka and A. Asakawa, “Study on Lightning Overvoltage Generated on Power Distribution Lines with Telecommunication Cables”, *IEEE Trans. PE.*, Vol. 122, No. 12, pp. 967-972 (2012)
- [2.17] 吉永淳, 碓氷光伸, 園田敏雄, 浅川聡, 関岡昇三:「配電系統および需要家に侵入するサージの実験的評価 —接地極, コンクリート柱の過渡応答特性および需要家侵入サージ—」, 電気学会論文誌 B, Vol. 124, No. 4, pp. 588-596 (2004)
- [2.18] 松浦進, 野田琢, 浅川聡, 横山茂:「実規模高圧配電線雷サージ特性の測定と高圧配電線解析モデルの検証」, 電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 9, pp.1150-1158 (2008)
- [2.19] 中田一夫:「配電用避雷器のライトニングパフォーマンスおよび焼損事故防止策に関する研究」, 電力中央研究所報告 総合報告, T50 (1997)
- [2.20] S. Yokoyama and A. Asakawa: “Experimental study of response of power distribution lines to direct lightning hits”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 4, No. 4, pp. 2242-2248 (1989)
- [2.21] 電気学会電気規格調査会編, 「JEC-0202 インパルス電圧・電流試験一般」, 電気書院 (1994)
- [2.22] 佐藤智之, 本郷保二, 本田秀樹, 三木恵, 横山茂, 松本聡:「6.6 kV 配電機材の放電様相と雷サージ絶縁協調特性」, 放電研究, Vol. 54, No. 2 pp. 8-15 (2011)
- [2.23] R. D. Caldwell and M. Darveniza: “Experimental and Analytical Studies of the Effect of Nonstandard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation”, *IEEE Trans. Pow. App. Syst.*, Vol. PAS-92, No.4, pp. 1420-1428 (1973)
- [2.24] P. Chowdhuri, A. K. Mishra and B. W. McConnell: “Volt-Time Characteristics of Short Air Gaps under Nonstandard Lightning Voltage Waves”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, PWRD-12, No. 1, pp. 470-476 (1997)
- [2.25] A. Ancajima, I. Baran, M. Costea, A. Carrus, E. Cinieri G. Dragan and C. Mazzetti: “Breakdown Characteristic of MV Distribution and Electric Traction Lines Insulators Stressed by Standard and Short Tail Lightning Impulses”, *Proc. IEEE Power Tech 2005*, pp. 1-7 (2005)
- [2.26] 池田義一・角紳一:「日本の雷パラメータ」, *Research Letters on Atmospheric Electricity*, Vol. 1, pp. 41-44 (1987)

- [2.27] H. R. Armstrong and E. R. Whitehead, “Field and Analytical Studies on the Transmission Line Shielding”, *IEEE Trans. Pow. App. Sys.*, Vol. PAS-87, pp. 270-281 (1968)
- [2.28] IEEE WG on Lightning: “A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Line”, *IEEE Trans. Pow. App. Sys.*, Vol. 104, No. 4, pp. 919-922 (1985)
- [2.29] T. Funabashi and S. Sekioka, “Smart grid in Japan associated with lightning protection of renewable energies”, *Proc. of International Conference on Lightning Protection (ICLP) 2016*, No.120 (2016)
- [2.30] 国土交通省 国土数値情報 HP < http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/old/old_datalist.html >
- [2.31] 吉田友一，石本和之，浅川聡，今田剛志：「雷リスク評価に基づく中国地方の高圧配電線における合理的な雷害対策」，電気学会論文誌 B，Vol. 137，No. 6，pp. 460-468 (2017)

第3章 無線通信鉄塔雷撃時の配電線および需要家設備の雷害対策

3.1 はじめに

近年の情報通信網の高速化やエリア拡大に伴い、平野部において携帯基地局等の無線通信設備が増加している。無線通信設備は地上高 10～40 m 程度の通信鉄塔および局舎により構成され、通信鉄塔が雷撃を受けやすい状況にある。通信鉄塔へ雷撃が生じた場合、無線通信設備の接地電位上昇により無線通信設備と配電線との間に電位差が生じ、図 3-1 に示すように、配電線側に雷電流の一部が流入する、いわゆる「逆流雷」と呼ばれる現象が生じる。

冬季の日本海側等の一部の地域でのみ発生する冬季雷は、雷電流の継続時間が長いため、エネルギーが大きく、かつ、夏季雷に比べ高構造物に雷撃が集中しやすいという特徴を持つ。このため、我が国では、日本海沿岸の冬季雷発生地域において、無線通信設備からの逆流雷による避雷器の焼損や柱上変圧器等の高圧配電線の雷被害が問題となり、逆流雷に対する効果的な雷害対策の検討が多く実施されてきた。この結果、冬季雷発生地域における高圧配電線の逆流雷対策として、多条化を含めた架空地線の施設や避雷器の放電耐量の格上が効果的であることが明らかとなっている^[3.1]。また、文献[3.2]-[3.4]では、無線通信設備や風力発電設備への雷撃時に配電線へ逆流する雷電流の低

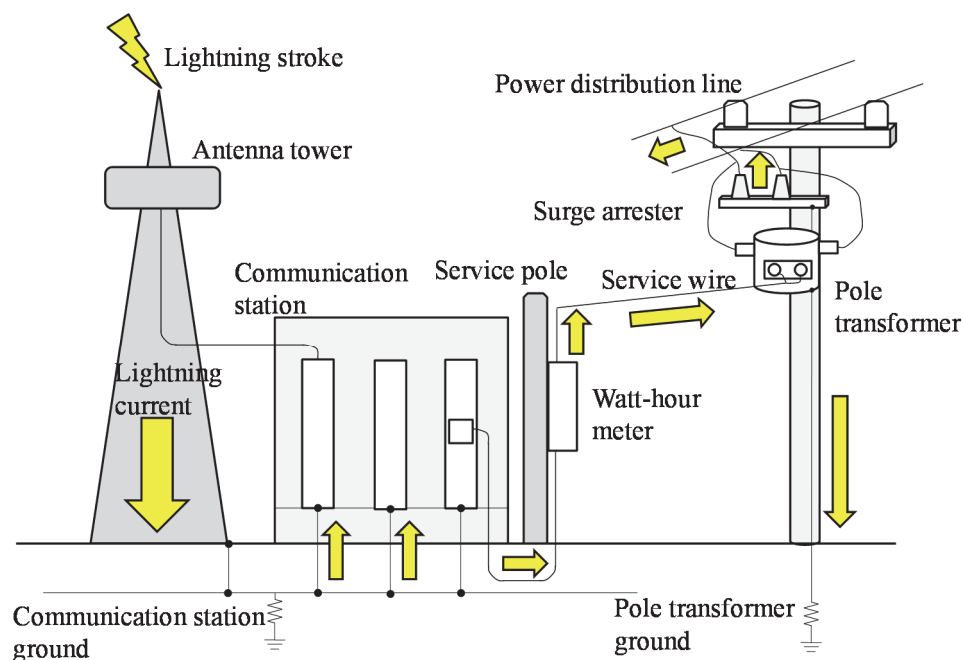


図 3-1 無線通信設備から配電線への逆流雷

減のためには、無線通信設備や風力発電設備の接地抵抗値の低減が効果的であることも示されている。

ただし、上記の文献では、避雷器の焼損を中心とする高圧配電線の雷害対策の検討は詳細に実施されているものの、当該配電線から電力を供給されている一般住宅に施設される需要家機器の雷害対策についての検討は行われていない。これは、従来は無線通信設備が山頂に設置される場合が多く、近隣に一般住宅があまりなかったことによる。一方で、前述のように近年では、無線通信設備が一般住宅近くの平野部にも施設され、通信鉄塔への雷撃に伴う需要家機器の雷被害も顕在化している。日本海側の冬季雷発生地域における調査結果によれば、無線通信設備とその周辺設備の約30%において何らかの雷被害が発生しているという報告もあり^[3.5]、高圧配電線だけではなく、低圧配電線や、無線通信設備周辺の需要家機器の雷害対策を検討することが重要な課題となっている。

上記を踏まえ、本章では、無線通信鉄塔への雷撃時における、配電線および一般住宅内の需要家機器の効果的な雷害対策手法を実験・解析の両面から明らかにした結果について述べる。

3.2 無線通信設備への雷撃による雷被害事例

図3-2に無線通信鉄塔への雷撃に伴う、配電線および需要家設備の逆流雷被害事例を示す。本事例では、周辺に無線通信設備以外の高層建物が存在しないことから、無線通信設備への雷撃が推定されている。無線通信設備では、エアコンのものと思われる室外機の被害は報告されているものの、通信機器等の被害は報告されていない。一方で、無線通信設備から配電線に逆流した雷電流によって、配電線に取り付けられている避雷器の焼損が発生しているほか、無線通信設備から約300m離れた需要家においても雷被害が発生している。

今回の事例において、このように雷被害が広範囲に拡大した理由として、①冬季に発生する雷は継続時間が長くエネルギー量が極めて大きいこと、および②無線通信設備に電力を供給する柱上変圧器バンクと、他の柱上変圧器バンクが共同接地線により接続されており、雷電流が遠方まで流れやすい状況にあったこと、の2点が考えられる。このため、効果的な逆流雷対策を行うためには、配電設備構成毎の雷電流の分流様相を把握することが重要となる。

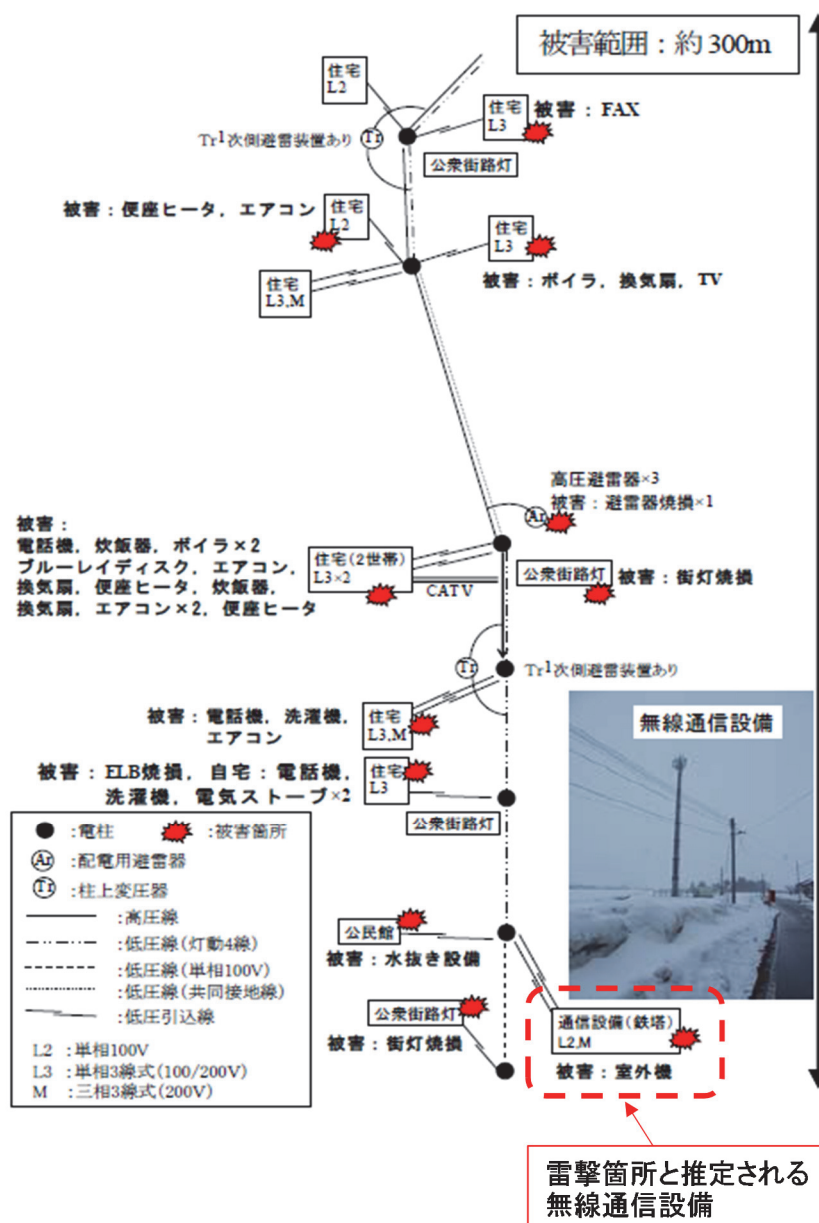


図 3-2 無線通信設備への雷撃に伴う配電線及び需要家機器の雷被害事例^[3. 5]

3.3 本研究で検討を行った逆流雷対策の概要

冬季雷発生地域においては、雷電流のエネルギーに起因する被害が問題となることがよく知られており^[3.1]、雷被害の低減のためには、機器に流入する雷電流を抑制することが最も重要となる。上記を踏まえ、本章では、本研究で検討を行った雷害対策の一覧とそれぞれの期待される効果についての概要を述べる。

3.3.1 無線通信設備への配電線からの電力供給方式

無線通信設備は100Vもしくは200Vの低圧で受電している場合が多く、このような場合に配電線から無線通信設備へ電力を供給する方法としては、図3-3(a)に示すように、高圧配電線末端に柱上変圧器を施設し、そこから低圧配電線を通信設備まで延長することにより電力を供給する方法（以下、低圧配電線供給と記す）、もしくは図3-3(b)に示すように、通信設備の直前まで高圧配電線を延長し、高圧配電線末端に通信設備に電力を供給するための専用の柱上変圧器を施設し通信設備に電力を供給する方法（以下、専用変圧器供給と記す）の2パターンが考えられる。

低圧配電線供給のパターンでは、無線通信鉄塔への雷撃時に、通信設備への電力引込線～低圧配電線～需要家家屋への電力引込線という経路で雷電流の多くが同じ柱上変圧器バンクの需要家家屋に流入する可能性がある。一方で、専用変圧器供給の場合には通信設備への電力引込線は配電線末端で柱上変圧器2次側巻線を介して接地され、需要家家屋に電力を供給する柱上変圧器バンクとは切り離されるため、需要家家屋に流入する雷電流を軽減できる可能性がある。このため、今回の検討では需要家機器の雷被害低減を目的として、無線通信設備への電力供給方法が需要家機器に発生する雷サージ様相に与える影響について検証を行った。

3.3.2 配電線への架空地線の施設

冬季雷発生地域における高圧配電線の雷害対策としての架空地線の施設効果はよく知られており、架空地線の条数を1条から2条へ増加させることにより、避雷器の焼損率が1/3程度になるとの報告もある^[3.1]。これは、架空地線へ雷電流が分流することで、高圧配電線に取付けられた避雷器を通過する雷電流が減少するためである。このため、今回の検討では架空地線を架線し、各コンクリート柱で接地することにより、避雷器が処理するエネルギーの低減効果について検証を行った。

3.3.3 無線通信設備の接地と配電線側の接地の接続

電気設備の技術基準の中には、電気事業者の設備の接地と無線通信設備（需要家設備）の接地を接続することの是非についての明確な記載はなく^[3.6]、現状では通信設備の接地と配電線の接地はそれぞれの設備の管轄箇所の違いや、事故時の保安上の観点から、接続されていない場合が大多数で

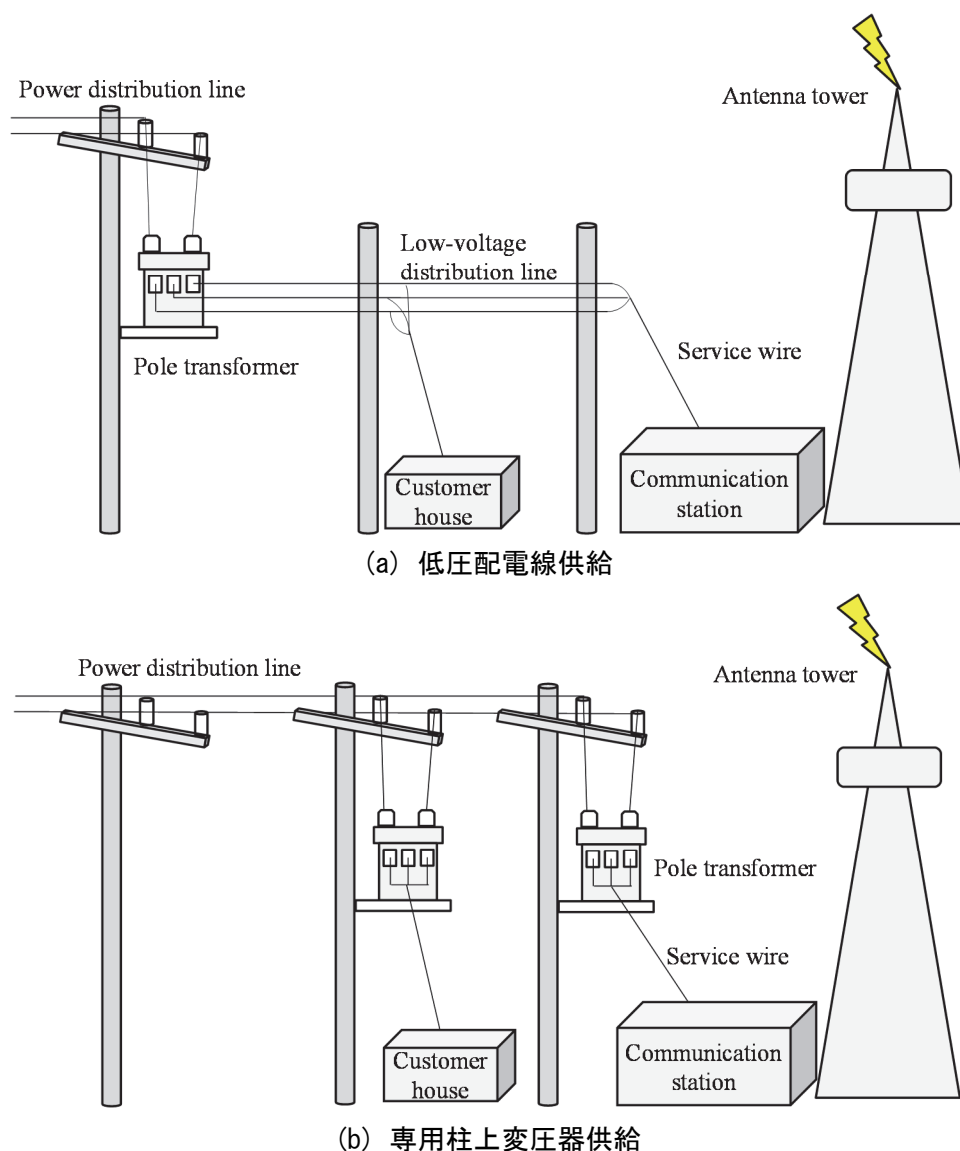


図 3-3 無線通信設備への電力供給方法

ある。しかしながら、雷電流の分流という観点から見ると、両者の接地を接続し、接地の等電位化を行うことにより、通信設備と配電線末端柱の間の電力引込線を通過する雷電流を大幅に軽減できる可能性が高い。

そこで、今回の検討では図 3-4 に示すように標準雷インパルス電圧における放電電圧が 1500 V の放電ギャップを介して通信設備の接地と配電線の接地を接続した場合の検討を行った。これにより、通常時は通信設備接地と配電線の接地は絶縁されており、雷撃時に過電圧が発生した際のみ両者の接地が接続されることとなる。無線通信設備の接地と配電線の接地の接続により、引込線を通過する電流が減少すれば、引込線に接続される電力量計や柱上変圧器の雷被害の低減が期待できる。

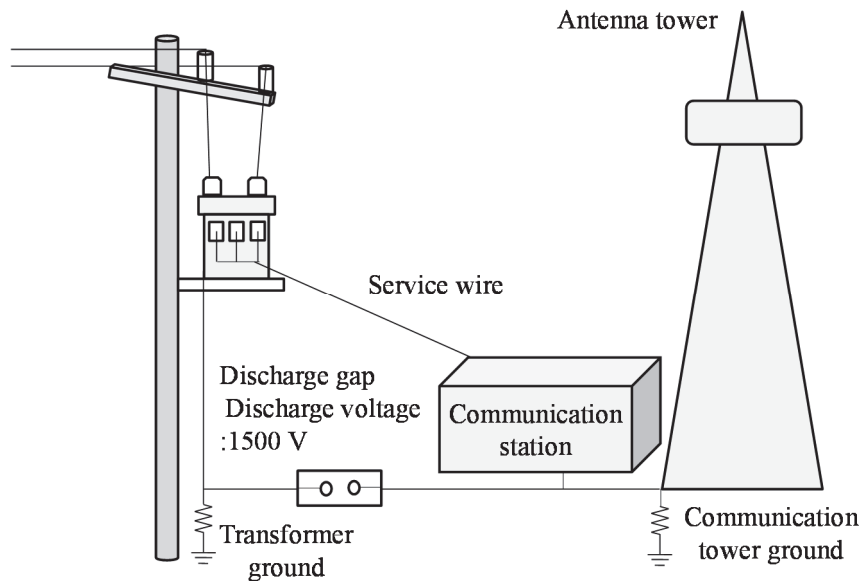
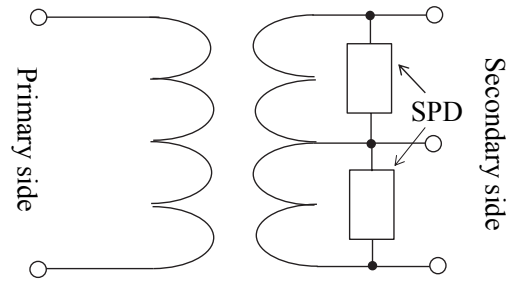


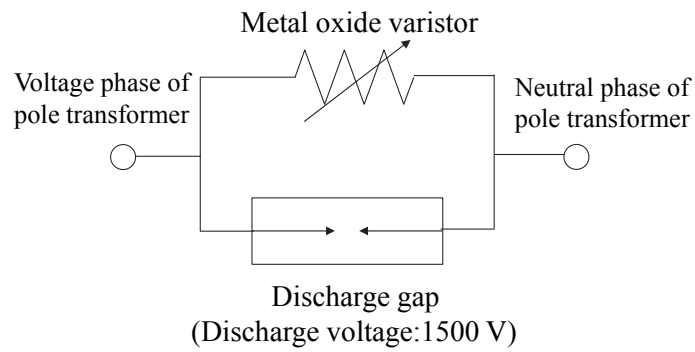
図 3-4 放電ギャップを介した無線通信設備接地と配電設備接地の接続方法

3.3.4 柱上変圧器 2 次側への Surge Protective Device (SPD) の取付け

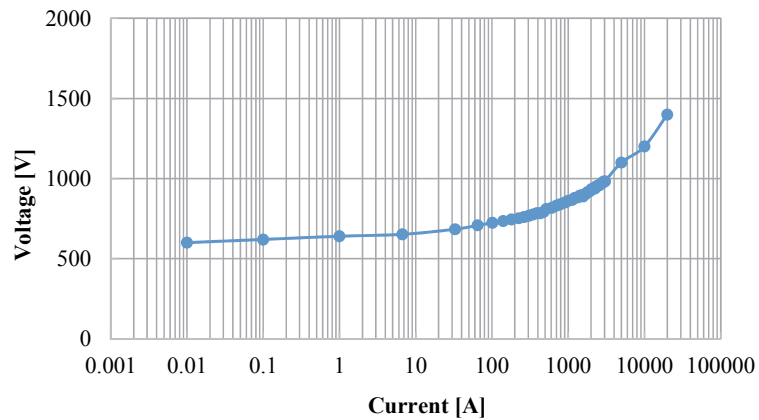
冬季雷発生地域において、無線通信設備から配電線への逆流雷が発生した際、引込線を流れる雷電流の一部が柱上変圧器 2 次側巻線を通過することにより、柱上変圧器が雷被害を受けることがある^[3.7]。この対策として、柱上変圧器の 2 次側線間への Surge Protective Device（以下、SPD と記す）の取付けにより、①柱上変圧器 2 次側の線間電圧を抑制すること、および②柱上変圧器 2 次側巻線を通過する雷電流を低減することが有効であると考えられる。このため、今回の検討では、図 3-5 に示す金属酸化バリスタ（以下、簡単のためバリスタと記す）と放電ギャップ（放電電圧 1500 V）を並列に配置することにより構成された SPD を柱上変圧器 2 次側に施設した。



(a) SPD の取付け箇所



(b) SPD の等価回路



(c) バリスタの $V-I$ 特性

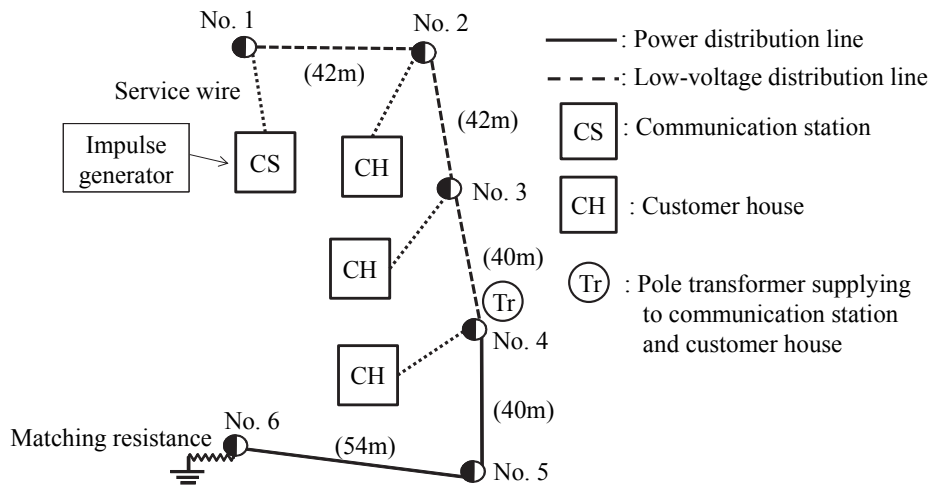
図 3-5 柱上変圧器 2 次側相間に取り付けた SPD の概要

3.4 試験配電線を用いた雷害対策の効果の検証

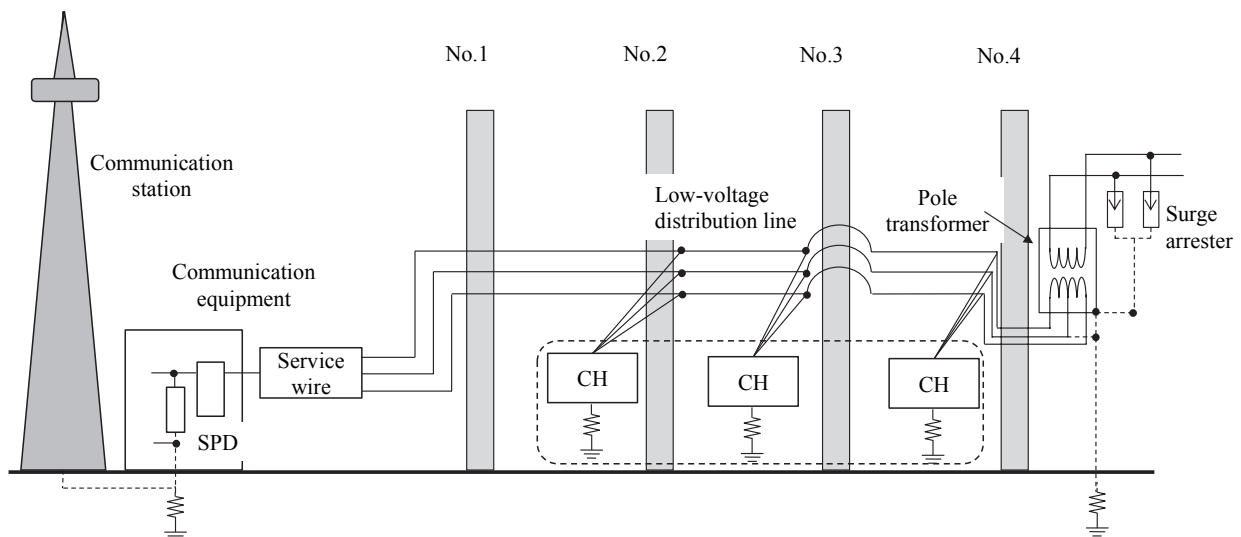
前節で述べた各種雷害対策の効果についての基礎的なデータを取得するため、電力中央研究所の12 MV インパルス電圧発生装置および試験配電線を用いて無線通信鉄塔雷撃時における配電線および需要家機器への雷電流分流様相ついて実験的な検討を行った結果を示す。

3.4.1 試験配電線の構成

今回の試験では、図 3-6 に示す低圧配電線供給、および図 3-7 に示す専用変圧器供給の2パターンの配電線構成で試験を行った。低圧配電線供給の試験では No. 4 柱（高圧配電線末端柱）に柱上

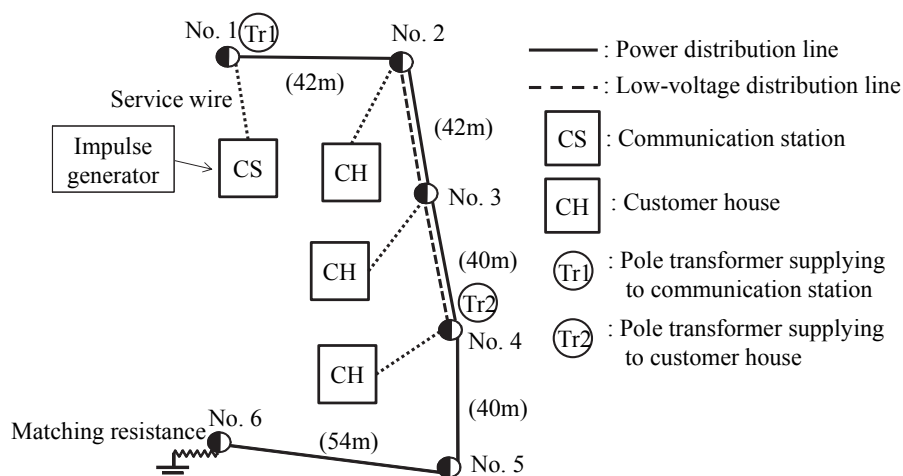


(a) 試験配電線路の全体図

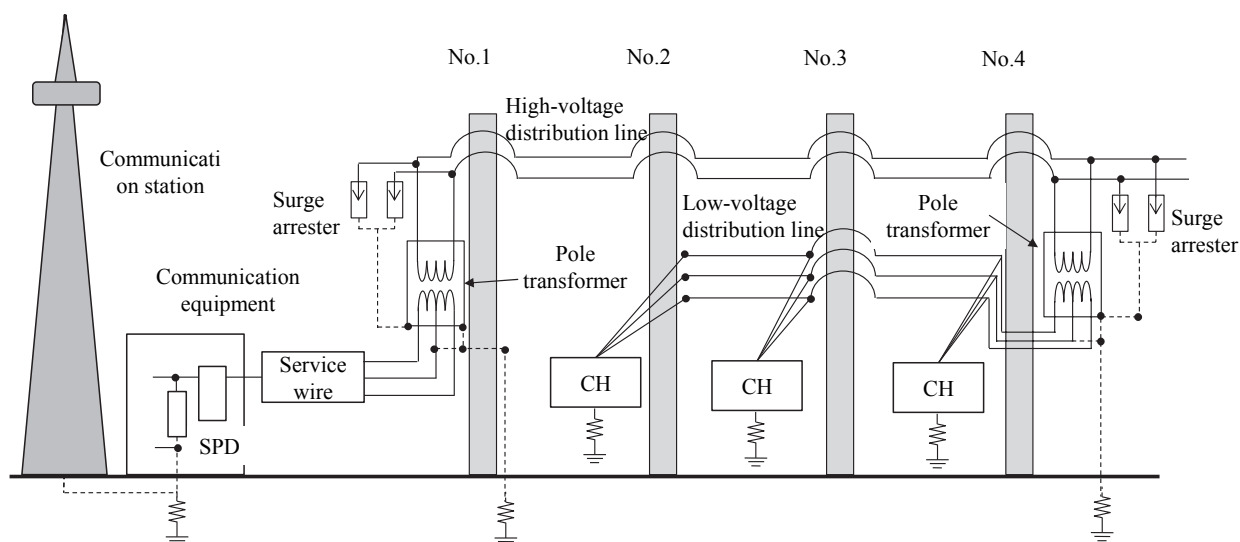


(b) 試験配電線路の詳細図

図 3-6 低圧配電線供給の試験配電線



(a) 試験配電線路の全体図



(b) 試験配電線路の詳細図

図 3-7 専用変圧器供給時の試験配電線

変圧器を施設し、そこから No. 1 柱（低圧配電線末端柱）まで低圧配電線を延長し、各柱から引込線を架線することにより無線通信設備および需要家に電力が供給されている形態の配電線を構築した。一方、専用変圧器供給の試験では No. 1 柱および No. 4 柱に柱上変圧器を施設し、無線通信設備へは No. 1 柱の柱上変圧器から、No. 2 柱から No. 4 柱の需要家には No. 4 柱の柱上変圧器につながる低圧配電線から電力を供給する形態の配電線を構築した。なお、今回の検討において、柱上変圧器は容量 10 kVA のものを用い、その 1 次側には柱上変圧器保護用の避雷器（外部ギャップの放電電圧：約 50 kV）を取付け、50 Ωで接地した。

図 3-8 に架空地線、配電線の導体配置を示す。今回の試験では、高圧配電線が架線されているコンクリート柱にはフラッシュオーバーを避けるために各柱において高圧配電線保護用避雷器（内部ギャ

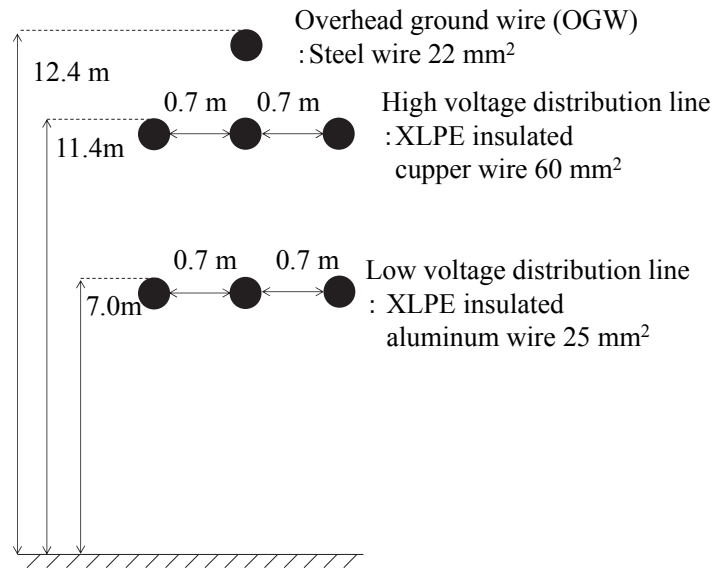


図 3-8 試験配電線の導体配置

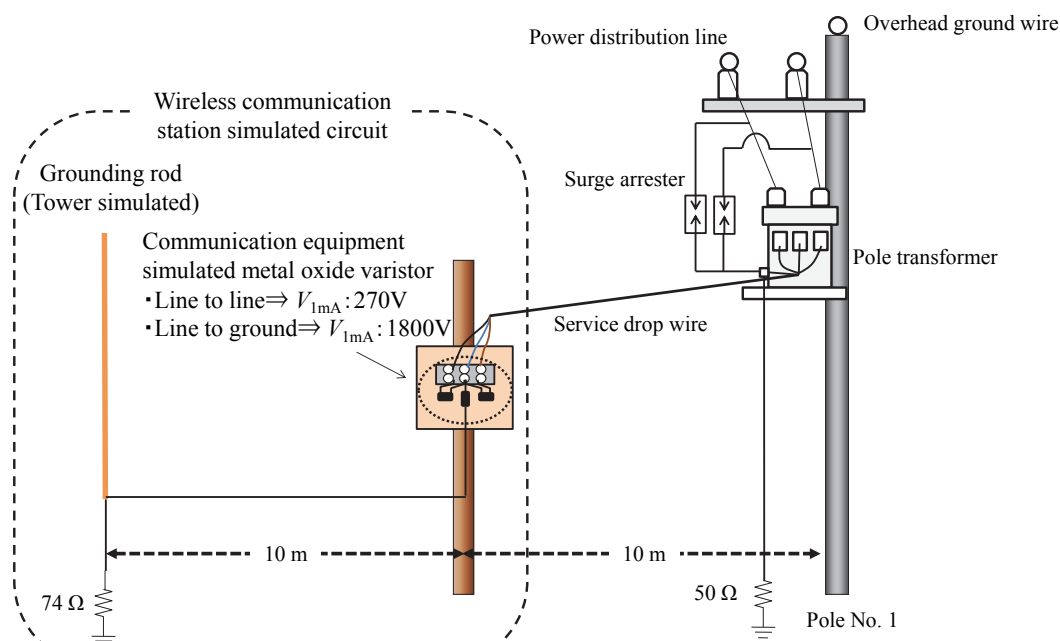
ップの放電圧：約 29 kV）を各相に取付けた。また、配電線の末端である No. 6 柱では、雷サージの反射の影響を避けるために、各導体を 400 Ωの整合抵抗を介して接地した。

3.4.2 無線通信設備および需要家設備の模擬

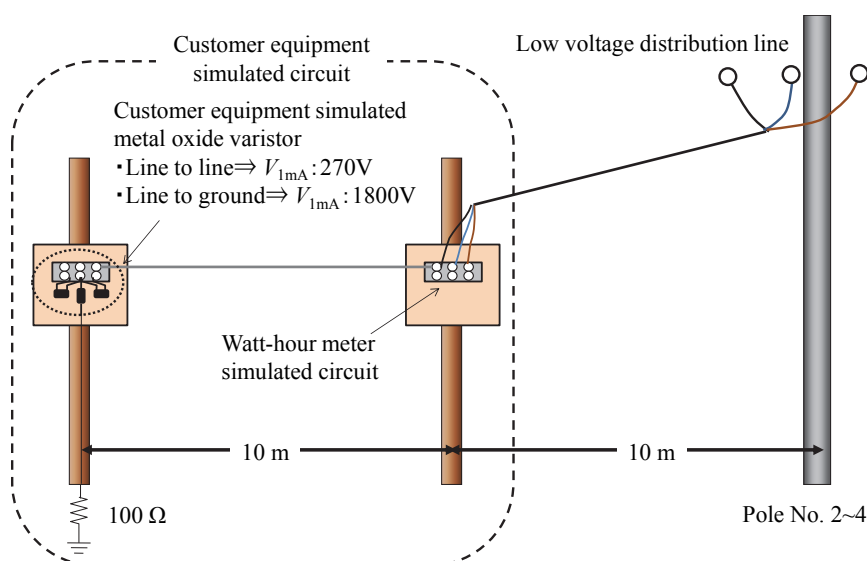
図 3-9(a)に無線通信設備の模擬回路を示す。本章の検討の主目的は、無線通信設備から配電線および需要家機器へ逆流する雷電流様相の把握であるため、無線通信設備については No. 1 柱から約 20 m 程度離れた箇所に設けた接地極と、1 mA 通過時のバリスタ電圧 V_{1mA} が 270 V および 1800 V バリスタで簡易的に模擬した。

一般に、無線通信設備の接地抵抗値は 10 Ω以下であることが多いが、インパルス電圧発生装置から出力される雷インパルス電流の多くを配電線側に流した方が、各種雷害対策の効果を検証するには適していたため、今回の試験では、無線通信設備の接地抵抗値を 74 Ωと実設備よりもかなり高い値に設定した。無線通信設備の接地抵抗値が低い場合の検討については次節の解析的検討で行う。

図 3-9(b)に No. 2 柱から No. 4 柱に施設した需要家設備模擬回路の概要を示す。今回の試験では低圧配電線から約 10 m 離れた箇所の電力量計へ 3 相撚線構造の引込線（DV 線）を架線し、電力量計の先は約 10 m の長さの 3 相の屋内配線である平形絶縁電線（VVF ケーブル）に接続した。屋内配線の末端には、給湯器や洗濯機等の接地された機器があることを想定し、線間に $V_{1mA}=270$ V，対地間に $V_{1mA}=1800$ V のバリスタ^[3.8]を接続し、100 Ωの巻線抵抗を介して接地した。



(a) 無線通信設備

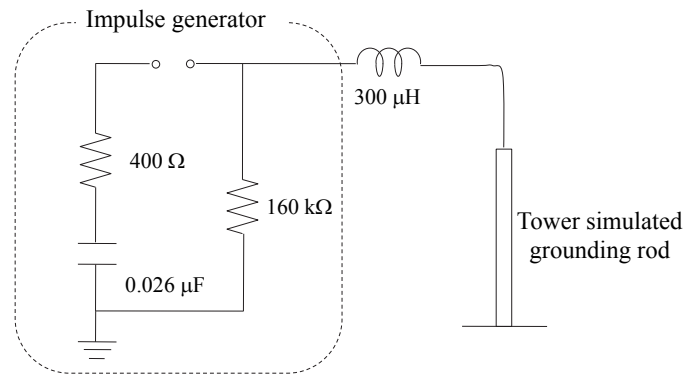


(b) 需要家設備

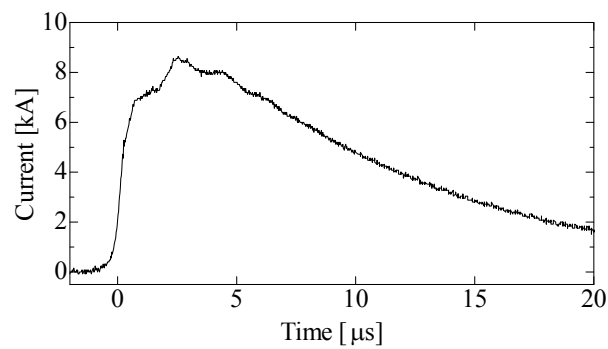
図 3-9 無線通信設備および需要家設備の模擬方法

3.4.3 試験方法

表 3-1 に今回の実験で検討した試験ケースの一覧を示す。今回の実験では、図 3-9(a)に示す通信鉄塔を模擬した接地棒に、図 3-10 に示すインパルス電圧発生装置から雷インパルス電流（正極性、波高値約 8.3 kA、波頭長 3.0 μs 、波尾長 11 μs ）を注入し、配電線各部を流れる雷電流を CT（Stanges 2-0.1WA、周波数帯域：1 Hz～20 MHz）により測定した。それぞれの箇所で測定した電流波形は、



(a) インパルス電圧発生装置の等価回路



(b) 出力電流波形

図 3-10 インパルス電圧発生装置の等価回路と出力電流波形

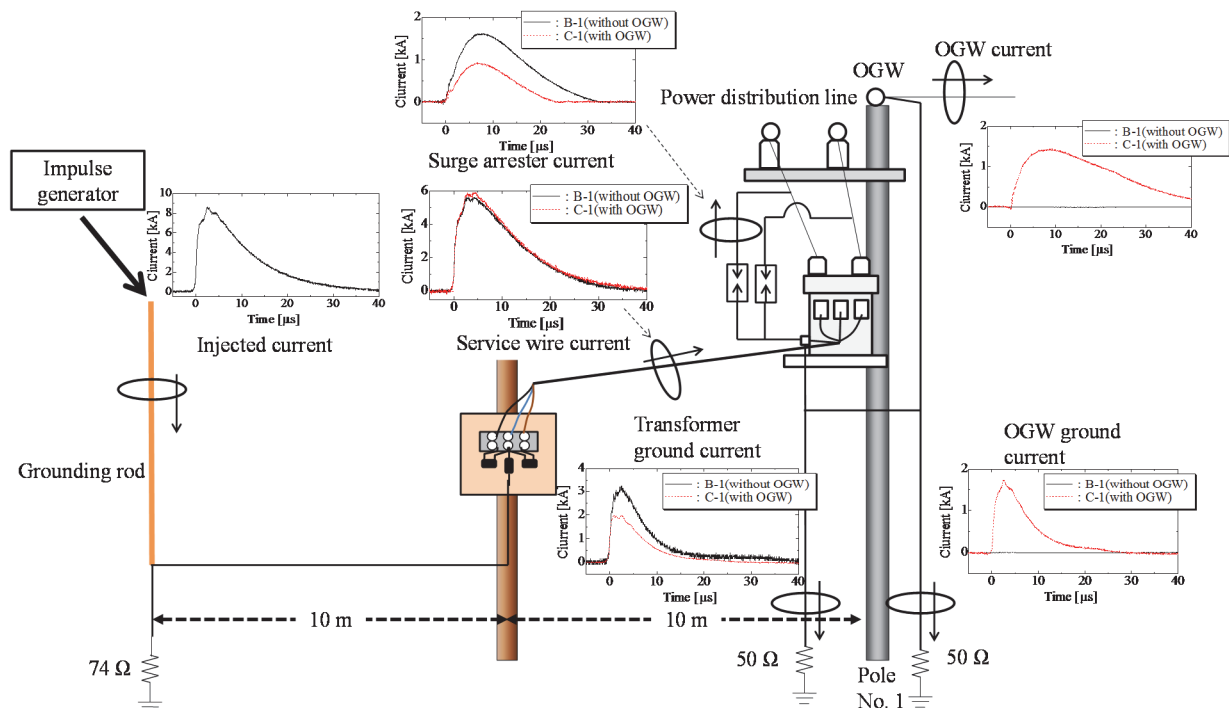
表 3-1 試験ケース一覧

Case No.	Experimental parameter			
	(1)	(2)	(3)	(3)
	Power supply method to communication station	Installation of OGW	Connection of communication station and distribution system ground	Installation of SPD to secondary side of pole transformer
A-1	Low voltage distribution line			
A-2			○	
B-1	Pole transformer	—		—
B-2		—	○	—
B-3		—	—	○
C-1		○	—	—
C-2		○	○	—
C-3		○	—	○

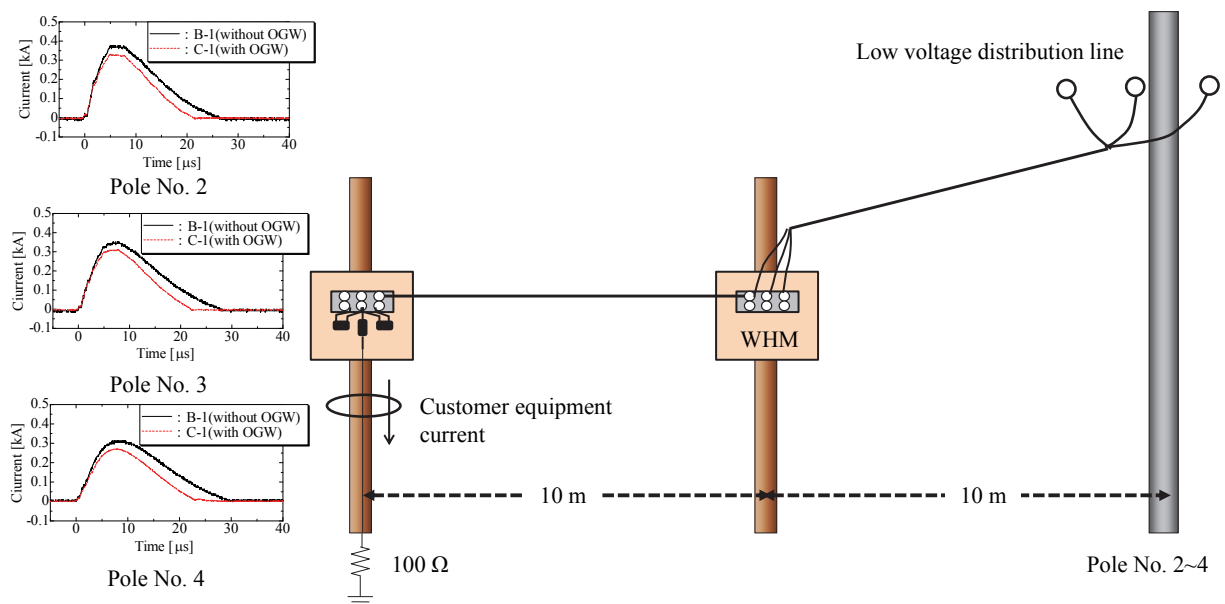
第3章 無線通信鉄塔雷撃時の配電線および需要家設備の雷害対策

E/O-O/E 変換器（ホトニクス PH-A360-051-20，周波数帯域：DC～30 MHz）により光変換した後，同期を取ってオシロスコープ（Tektronix TDS5105 B，周波数帯域：DC～2 GHz）に取り込んだ。

図 3-11 に Case B-1 および Case C-1 における測定波形を示す。今回の実験では架空地線は各コン



(a) No. 1 柱周辺の雷電流分流様相



(b) No. 2 柱～No. 4 柱の需要家機器の雷電流分流様相

図 3-11 測定波形の一例

第3章 無線通信鉄塔雷撃時の配電線および需要家設備の雷害対策

クリート柱で $50\ \Omega$ の接地を施した。このため、架空地線上を伝搬する電流がそれぞれのコンクリート柱に到達した際に、雷電流の一部が接地線を介して大地に流れ込むこととなる。また、架空地線や、No. 1 柱の柱上変圧器保護用避雷器の放電により高圧配電線を流れる電流は、No. 4 柱まで到達した後、No. 4 柱に施設された柱上変圧器を介して低圧配電線に流れ込み、最終的には No. 2 柱～No. 4 柱の需要家の機器に流入することとなる。同図から、架空地線が施設されることにより、No. 1 柱に施設された柱上変圧器保護用避雷器や No. 2～4 柱に施設された需要家機器を流れる電流の波高値及び波尾長が減少していることが分かる。

今回の実験では、表 3-1 に示すケース毎に、各部に流れる電流の分流様相を測定し、各種雷害対策の効果について検討を行った。なお、今回の試験で用いた電流波形の波尾長は $11\ \mu\text{s}$ 程度と実際の雷に比べ、かなり短い値であるため、ここでは雷電流のエネルギーについての評価は行わず、電流波高値を比較することによって雷害対策の効果を評価した。エネルギー面からの評価については、次節の解析的検討で示す。

以降の検討では、結果を分かりやすくするために、実験ケース毎に配電線の各箇所測定された電流値は、印加電流の波高値を 100 % とした際の比率として示すこととした。

3.4.4 試験結果

(I) 無線通信設備への電力供給方法が需要家機器に流入する雷電流に与える影響(3.3.1 項の対策の効果検証)

図 3-12 に無線通信設備への電力供給方法が低圧配電線供給の場合 (Case A-1) と、専用柱上変圧器供給で架空地線無しの場合 (Case B-1) における、需要家機器を通過する電流波高値の比率を示す。同図から、専用柱上変圧器供給の場合の方が、需要家機器に流入する電流の比率が大幅に低減していることが分かる。これは、専用柱上変圧器供給の場合には高圧配電線および高圧配電線末端柱 (No. 1 柱) の柱上変圧器の接地に電流の一部が流れることに起因する。

(II) 専用柱上変圧器供給時の架空地線の施設の効果(3.3.2 項の対策の効果検証)

(I) の結果から、需要家機器を通過する電流を低減するためには、専用柱上変圧器により無線通信設備に電力を供給することが有効であることが分かる。一方で、専用柱上変圧器供給の場合には高圧配電線末端に柱上変圧器およびこれを保護するための避雷器が施設されることになり、これらの機器の雷被害が懸念される。このため、これらの機器の負担を減少させるための対策についても検討を行うことが重要となる。ここでは架空地線の施設により、各部を通過する電流がどの程度低減するかを実験的に検証した。

図 3-13 に専用柱上変圧器供給の場合の各部の電流分流比率を示す。架空地線の施設により通信設備への電力引込線を通る雷電流の波高値が若干増加している。これは、架空地線の接地の影響等により通信設備側から見た配電線側のインピーダンスが若干低下したためであると考えられる。

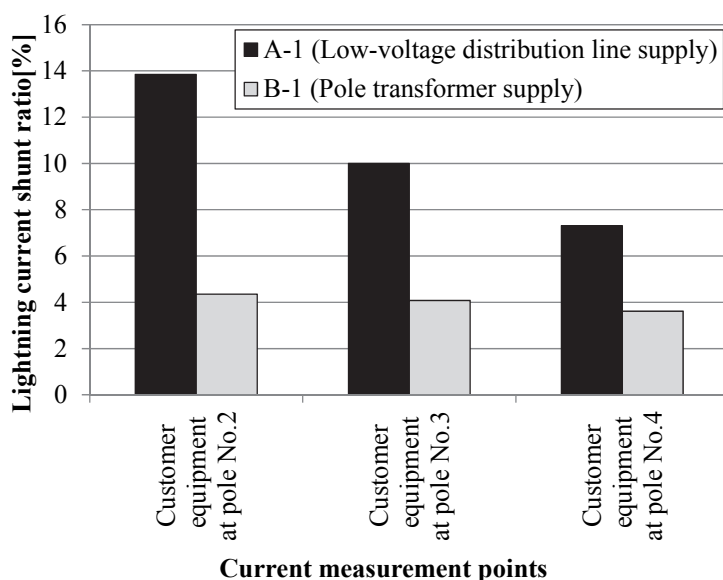


図 3-12 無線通信設備への電力供給方法と需要家機器通過電流波高値の関係

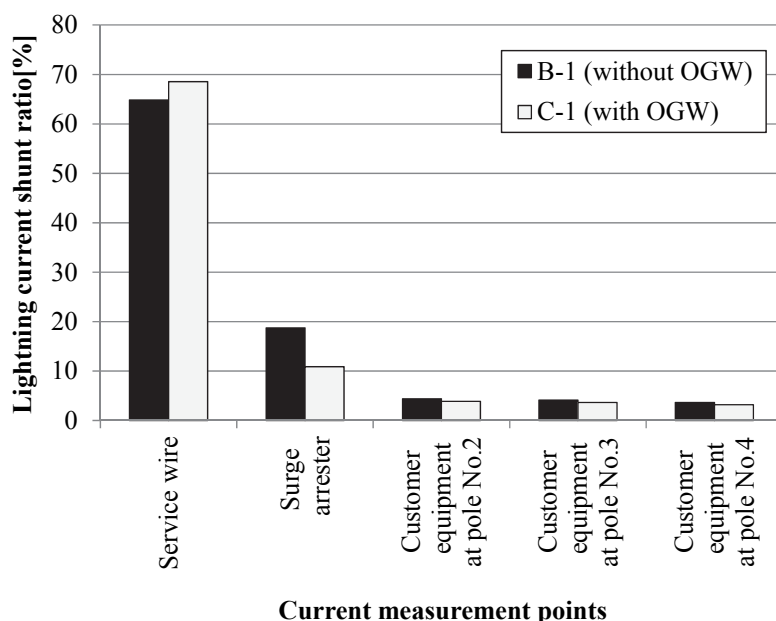


図 3-13 架空地線の有無が各部を通過する電流波高値に与える影響

しかしながら、引込線を流れる電流が増加したにもかかわらず、柱上変圧器保護用避雷器を流れる雷電流の波高値は 1/2 程度に減少している。このことから、架空地線の施設は高圧配電線末端柱に施設される避雷器の焼損対策として効果的であることが分かる。また、需要家機器を通過する電流は架空地線を架線してもあまり変化していない。

(III) 無線通信設備接地と配電線の接地接続の効果 (3.3.3 項の対策の効果検証)

無線通信設備の接地と配電線の接地の接続による効果の検証のため、今回の試験では、ビニル絶縁電線を接続接地線として引込線に沿わせた状態で架線し、放電電圧 1500 V の放電ギャップを介して接続した。

図 3-14 に低圧配電線供給 (Case A) および専用柱上変圧器供給 (Case B, C) において、無線通信設備と配電設備の接地の接続の有無が、引込線を通過する電流波高値に与える影響を示す。同図から無線通信設備の接地と配電線の接地を接続することにより引込線を通過する雷電流波高値が大幅に低減していることが分かる。

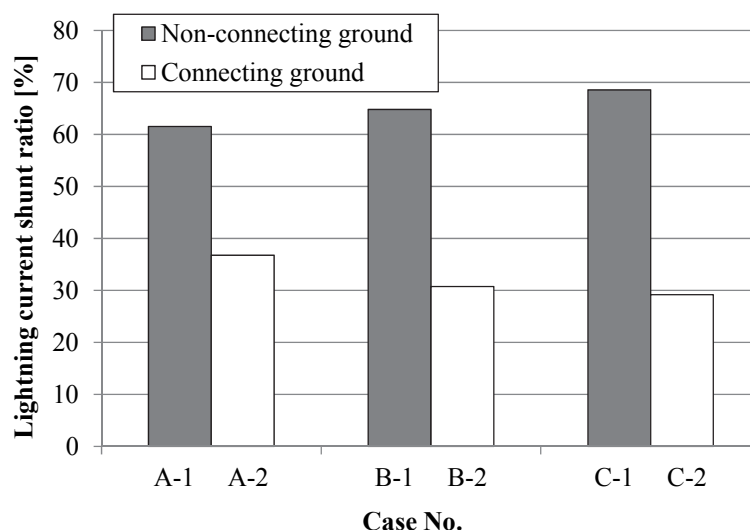


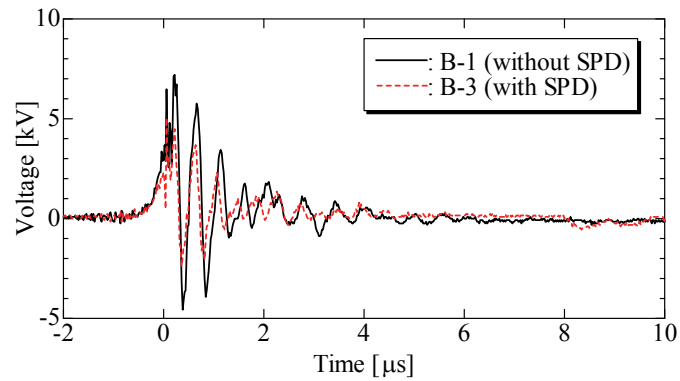
図 3-14 無線通信設備と配電設備の接地の接続の有無が引込線を通過する電流波高値に与える影響

(IV) 柱上変圧器 2 次側への SPD 取付けの効果 (3.3.4 項の対策の効果検証)

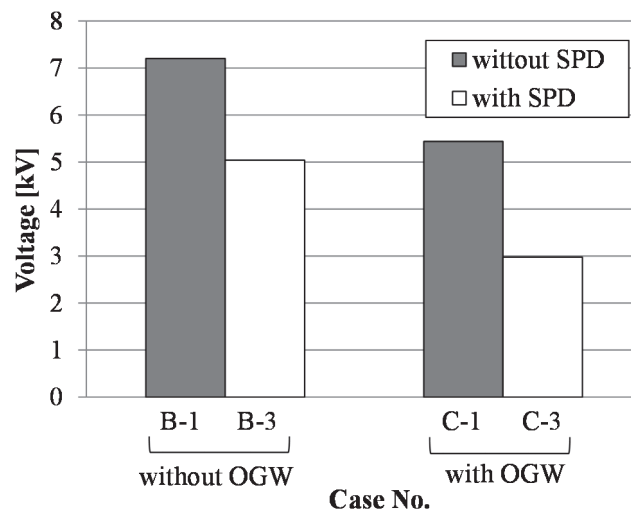
図 3-15(a)に SPD の有無による柱上変圧器 2 次側線間電圧波形の変化を示す。同図から、SPD の取付けによって、柱上変圧器 2 次側の線間電圧が抑制されていることが確認できる。また、図 3-15(b)から、架空地線の有無に着目すると、架空地線が架線された場合の方が、線間電圧は小さくなっている。

次に、SPD による柱上変圧器 2 次側巻線通過電流の抑制効果について検証を行う。図 3-16(a)に試験回路を示す。本検討に限り、柱上変圧器 2 次側電源相とインパルス電圧発生装置の出力線を接続し、2 次側中性相を接地することにより、柱上変圧器 2 次側巻線に雷インパルス電流を直接注入した。これによって、SPD が取付けられていない場合には注入電流がそのまま柱上変圧器 2 次側巻線を通過することとなる。一方で、SPD を取付けた場合には、SPD を通過する電流を測定することによって注入電流との差分から巻線通過電流が求まる。図 3-16(b)に試験結果を示すが、同図から明らかのように、柱上変圧器 2 次側電源相から注入された電流の大部分は SPD に流れ、柱上変圧器 2 次側巻線にはあまり電流が流れていないことが分かる。

以上の結果から、今回の検討で用いた SPD は柱上変圧器 2 次側の線間電圧および巻線通過電流の抑制の何れの観点からも十分な効果を有していると判断できる。

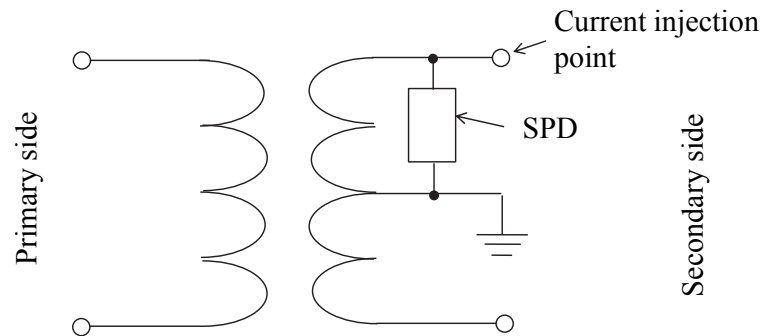


(a) 測定波形例

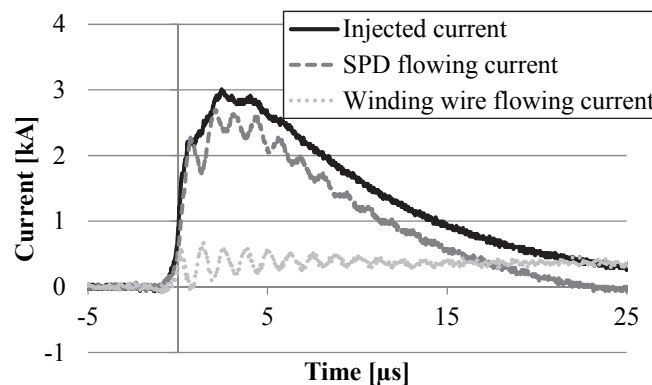


(b) 波高値

図 3-15 SPD の取付けが柱上変圧器 2 次側に発生する過電圧に与える影響



(a) 試験回路



(b) 測定波形

図 3-16 SPD の取付けが柱上変圧器 2 次側巻線通過電流に与える影響

(V) 試験結果のまとめ

インパルス電圧発生装置および試験配電線を用いた試験結果から、以下の①～④に示すように、3.2 節で検討した雷害対策は配電線および需要家機器の雷被害低減に対して効果的であることが分かった。

- ① 無線通信設備への専用柱上変圧器での電力供給による、需要家機器流入電流の低減
- ② 架空地線の架線による、避雷器通過電流の低減
- ③ 無線通信設備の接地と配電線の接地の接続による、通信設備への電力引込線通過電流の低減
- ④ 柱上変圧器 2 次側への SPD の取り付けによる、変圧器 2 次側線間電圧および巻線通過電流の抑制

しかしながら、今回の試験では、(i) 無線通信設備の接地抵抗値が実設備よりもかなり高い、(ii) 雷電流の波尾長が実際の雷電流よりかなり短い、といった点から、雷電流の分流様相が実設備におけるものとは若干異なる可能性がある。そこで、次節では、雷電流のエネルギー一面の評価に的を絞り、本論文で提案する雷害対策の効果を、雷サージ解析結果から評価する。

3.5 雷サージ解析による雷害対策の定量評価

本節では、電力系統瞬時値解析プログラム XTAP (eXpandable Transient Analysis Program)^[3.9]を用いた雷サージ解析により、通信鉄塔雷撃時の雷害対策の効果について示す。本章では、先ず試験条件を再現した解析結果を試験結果と比較することにより、雷サージ解析による検討の妥当性について示した後、解析条件をより実設備の条件に近づけた上で検討を行う。

3.5.1 試験結果の再現による雷サージ解析の有効性の検証

図 3-17 に XTAP 上に構築した解析モデルの概要を示す。高圧および低圧配電線は、図 3-7 に示した実験時の導体配置を基に、大地抵抗率を塩原実験場付近の値である $1000 \Omega \cdot \text{m}$ に設定することによりモデル化し、柱上変圧器については文献[3.10]で提案されているモデルを用いた。柱上変圧器が取り付けられた柱には、柱上変圧器保護用避雷器（放電電圧 50 kV）を、それ以外の高圧配電線が架線された柱には高圧配電線保護用避雷器（放電電圧 29 kV）を模擬した非線形抵抗を取付けた。それぞれの避雷器の $V-I$ 特性は図 3-18 に示すとおりであり、実験時に測定した値の純抵抗によって接地した。また、接地を施していないコンクリート柱についてはその接地抵抗値が測定不能であったため、図 3-19 に示す電流依存性を有する非線形抵抗でコンクリート柱の接地抵抗値を模擬した^[3.11]。

No. 2 柱から No. 4 柱に施設した需要家機器については、コンクリート柱から長さ 10 m の 3 相撚線構造の引込線（DV 線）と屋内配線として長さ 10 m の 3 相平形絶縁電線（VVF ケーブル）を架線した後、図 3-20 に示す特性のバリスタを屋内配線末端の線間および対地間に施設し、 100Ω の抵抗で接地することにより模擬した。

図 3-21 に Case C-1 おける解析結果と試験結果の比較を示す。一部に若干の差異があるものの、全体として解析結果は試験結果を良く再現できており、雷サージ解析による検討の有効性が示されたといえる。このため、次項では解析条件をより実際の設備条件に近づけた上で各種雷害対策の効果について評価を行うこととする。

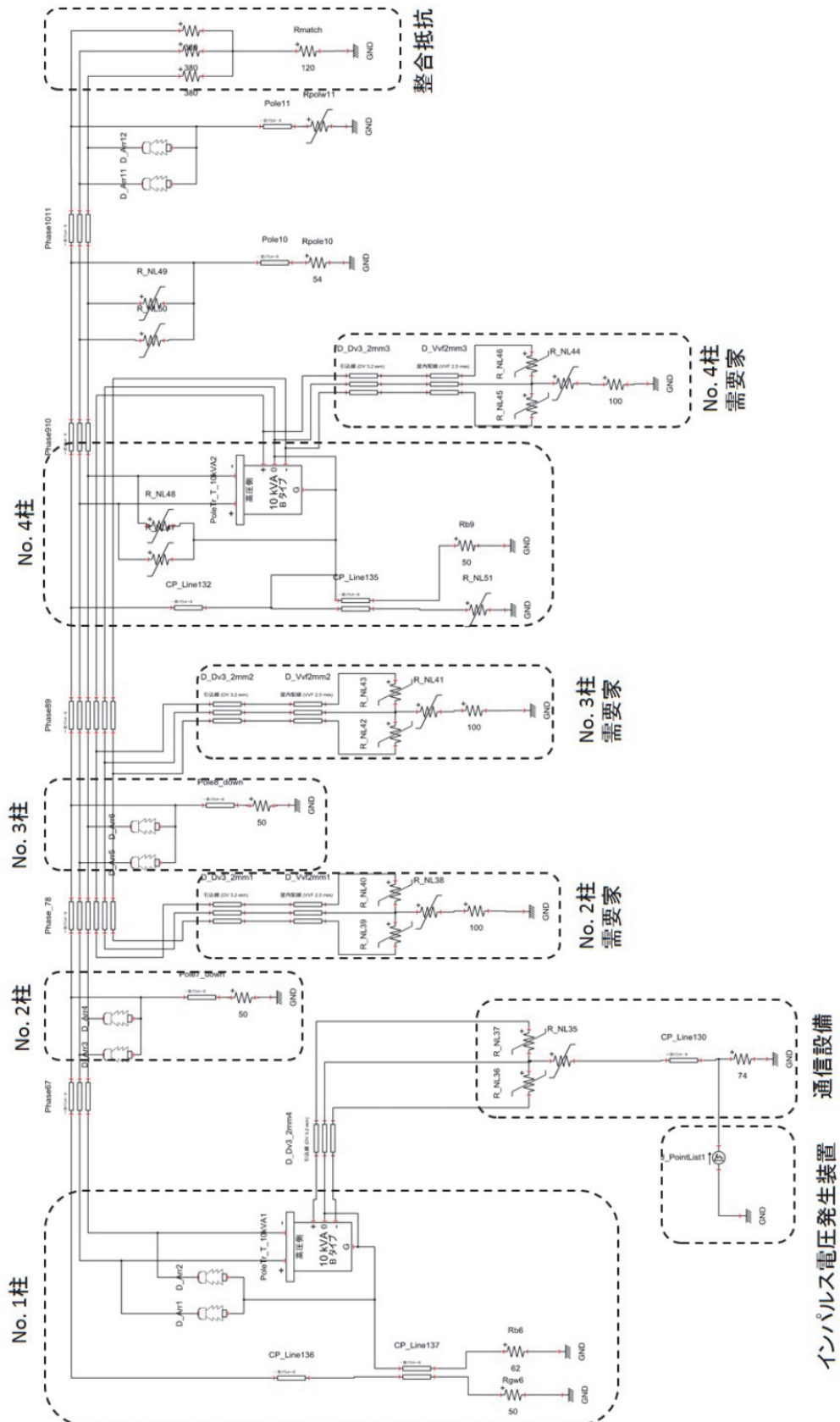


図 3-17 XTAP 上に構築した配電線路モデルの一例

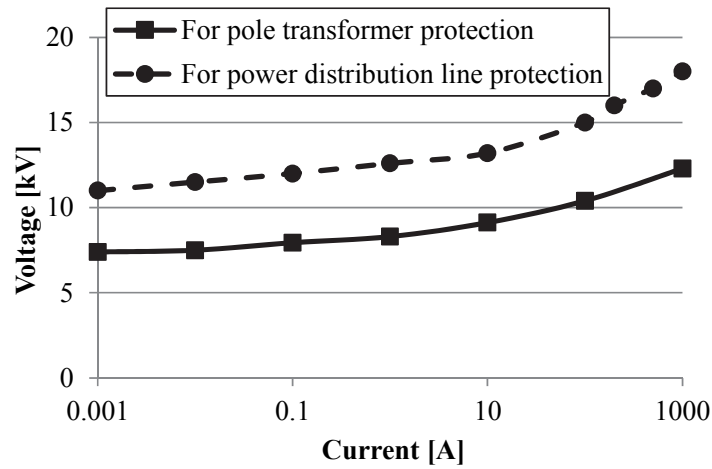


図 3-18 避雷器の $V-I$ 特性

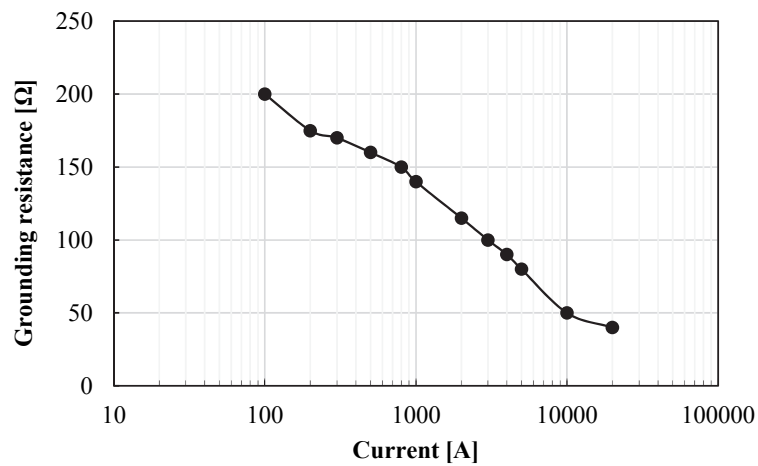


図 3-19 コンクリート柱の接地抵抗値の電流依存性^[3.11]

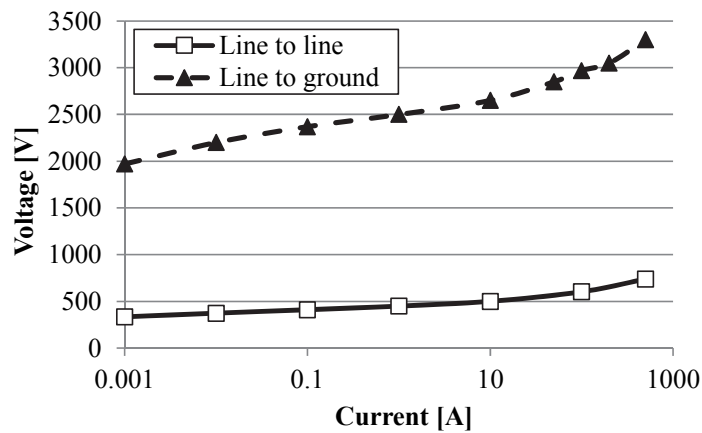


図 3-20 バリスタの $V-I$ 特性

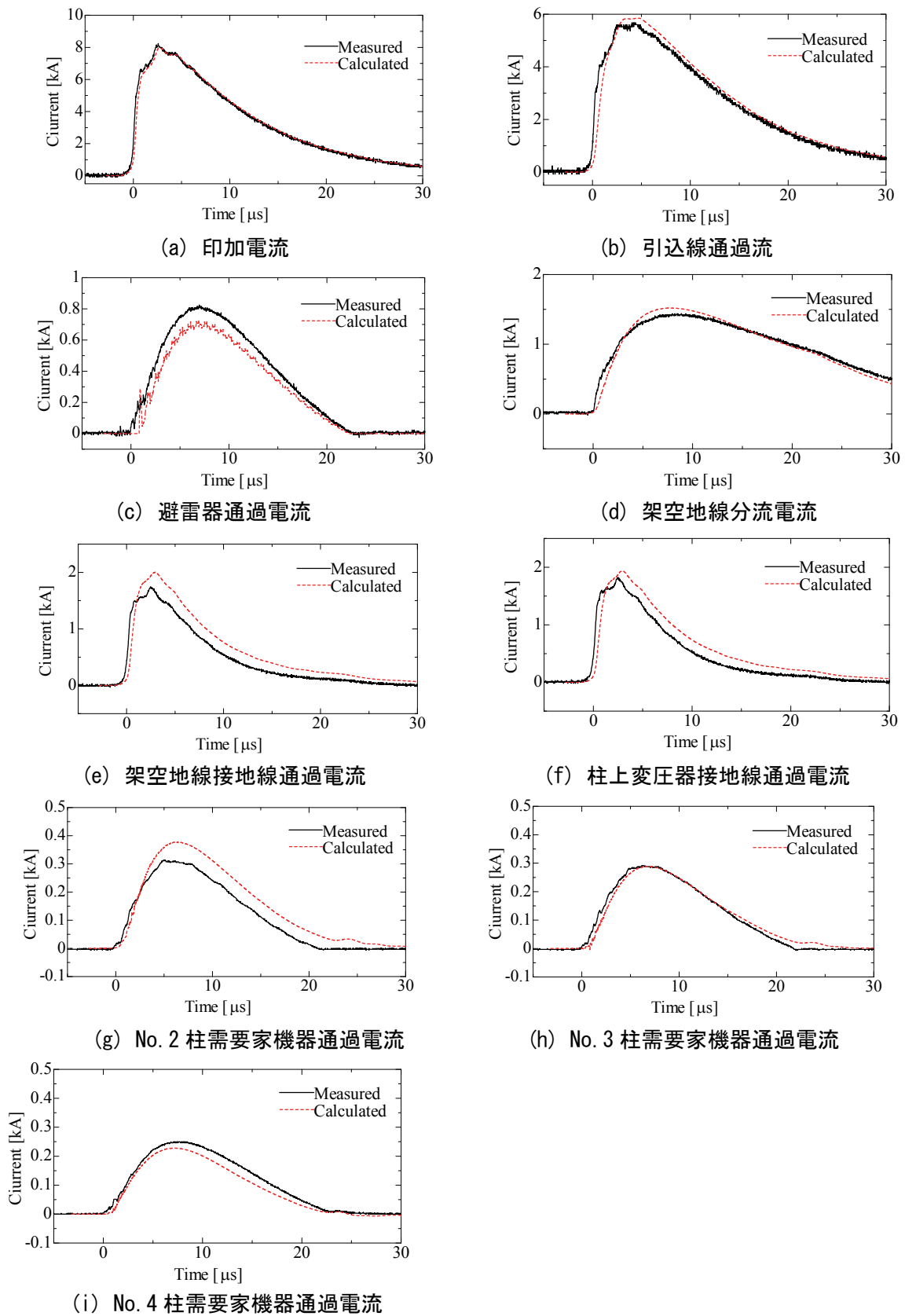


図 3-21 実験結果と解析結果の比較 (Case C-1)

3.5.2 実際の配電設備構成を考慮した雷サージ解析モデルの概要

ここでは、解析条件をより実設備に近づけるに当たり、3.5.1 項から変更を行った点について述べる。表 3-2 に今回の解析における各モデルの設定値を示す。今回の解析では、通信設備や需要家設備の配置は図 3-6 と同様としたが、配電線の径間長は 40 m に、各導体配置については、実際の設備形態を考慮して、図 3-22 のように変更した。また、試験では、低圧配電線支持がいしのフラッシュオーバーを考慮していなかったが、解析では実際の設備実態を考慮して、低圧配電線支持がいしのフラッシュオーバー電圧を 60 kV に設定した。なお、高圧配電線支持がいしについては、全ての柱に避雷器が取付けられているためフラッシュオーバーは発生しない。

表 3-2 雷サージ解析における設定値

Item		Condition
High voltage distribution line	Line type	XLPE insulated copper wire, Cross section:60 mm ²
Low voltage distribution line	Line type	XLPE insulated aluminum wire, Cross section:25 mm ²
	Flashover voltage	60 kV
Service wire	Line type	Polyvinyl-chloride-insulated drop service wires, Diameter: 3.2 mm
Overhead ground wire	Line type	Steel wire, Cross section: 22 mm ²
	Ground resistance	Shared with surge arrester
Grounding resistance of surge arrester	For transformer protection	60 Ω (Shared with pole transformer)
	For power distribution line protection	30 Ω
Concrete pole	Surge impedance	250 Ω
	Grounding resistance	Current-dependent value ^[3.11]
	Propagation velocity	3.0×10^8 m/s
Communication tower	Height	20 m
	Surge impedance	200 Ω
	Grounding resistance	5/10/20/73 Ω
	Propagation velocity	3.0×10^8 m/s
Ground resistivity		1000 Ω・m
Lightning current	Lightning path impedance	1000 Ω
	Waveform	Triangular waveform (10/350 μs)
	Crest value	30 kA

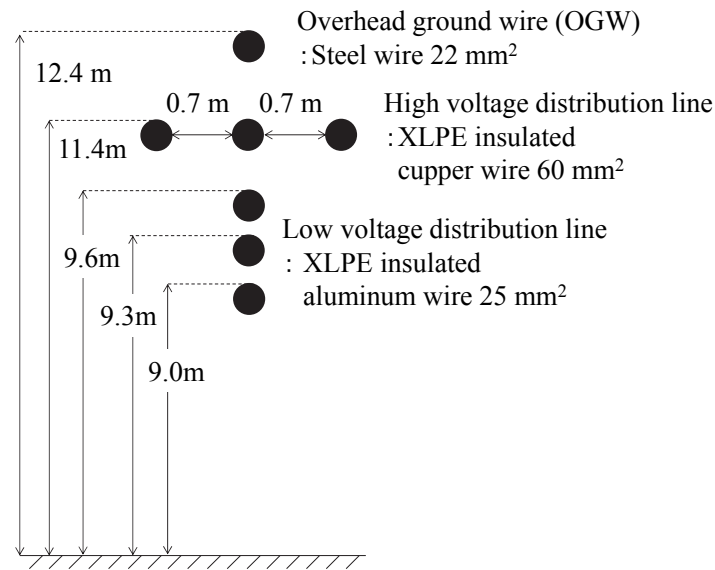


図 3-22 雷サージ解析における導体配置

各柱の接地抵抗値については、柱上変圧器が取付けられた柱（Case A では No. 4 柱，Case B および Case C 時は No. 1 柱および No. 4 柱）は $60\ \Omega$ ，それ以外の高圧配電線が架線された柱については $30\ \Omega$ ，低圧配電線のみが架線された柱については，3.5.1 項と同様にコンクリート柱の接地抵抗特性値を模擬する非線形抵抗とした。無線通信設備については，鉄塔を模擬する長さ $20\ \text{m}$ の分布定数線で模擬し，その接地抵抗値については，実際の設備条件に近い $5\ \Omega$ ， $10\ \Omega$ に加え，接地抵抗値が高い場合の $20\ \Omega$ ，3 章の実験結果とあわせた $74\ \Omega$ の結果について検討を行った。

また，今回の解析における雷電流波形は JIS Z 9290-1^[3,12]において直撃雷電流波形として規定された $10/350\ \mu\text{s}$ の三角波，波高値は Berger らによって観測された負極性第 1 雷撃の累積頻度分布 50 % 値の $30\ \text{kA}$ ^[3,13]，雷道インピーダンスは $1000\ \Omega$ とした。

以降では，雷サージ解析により無線通信鉄塔への雷撃時における各種雷害対策の効果をエネルギーの面から検討する。解析結果では，雷撃電流の電荷量（約 $10\ \text{C}$ ）を 100 % とした際の，各部を通過する雷電流の電荷量の比率を示す。

3.5.3 雷サージ解析によるエネルギー面からの評価

(i) 無線通信設備への電力供給方法が需要家機器に侵入する雷電流に与える影響(3.3.1 項の対策の効果検証)

図 3-23 に無線通信設備への電力供給方式と需要家機器を通過する電荷量比率の関係を示す。同図より、通信鉄塔の接地抵抗値が上昇すると需要家機器を通過する電荷量は増加する傾向にあるが、いずれの場合においても専用柱上変圧器供給のケースの方が低圧配電線供給のケースに比べ需要家機器を通過する電荷量が 1/2 程度になっている。これは、3.4 節に示す試験結果と一致しており、需要家機器の雷被害低減には専用柱上変圧器による電力供給が効果的であることを示している。

(ii) 専用柱上変圧器供給時の架空地線の施設の効果(3.3.2 項の対策の効果検証)

次に専用柱上変圧器供給のケースにおいて、架空地線の有無によって、無線通信設備への電力引込線、各需要家機器、および柱上変圧器保護用避雷器を通過する電荷量がどのように変化するかを図 3-24 に示す。図 3-24(a)から、架空地線が有るケースは架空地線が無いケースに比べ、引込線を通過する電流の電荷量が若干増加している。これは、架空地線を架線することにより、無線通信設備から見た配電線のインピーダンスが低くなることに起因しており、図 3-13 の実験結果とも一致している。また、図 3-24(b)から、需要家機器を通過する電荷量についても、架空地線の架線により若干ではあるが増加していることが分かる。

一方で、図 3-24(c)に示すように、柱上変圧器保護用の避雷器を通過する電荷量は架空地線の架線によって大幅に減少している。これは、架空地線の架線により避雷器を通過する電流の波高値のみならず、波尾長も大幅に短くなるためである。避雷器の焼損防止対策としての架空地線の施設の効果は広く知られており^[3.1]、今回の検討でも同様の結果となった。

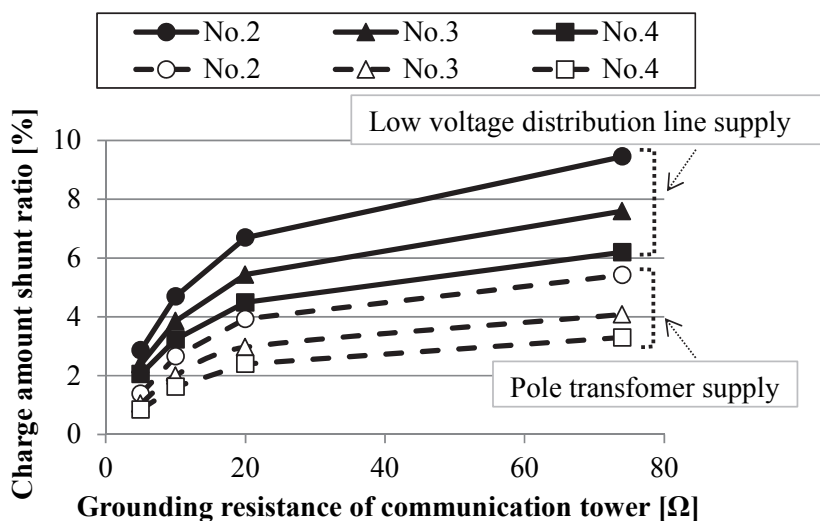
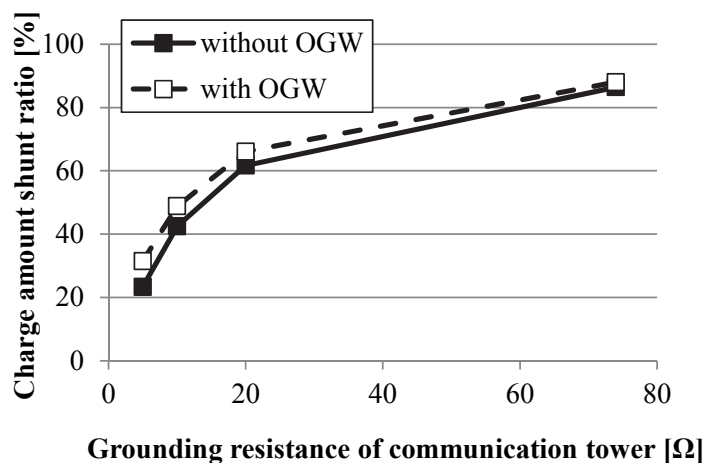
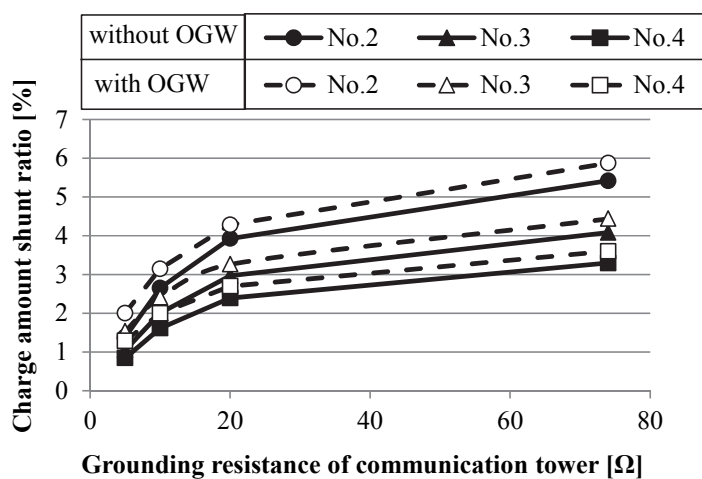


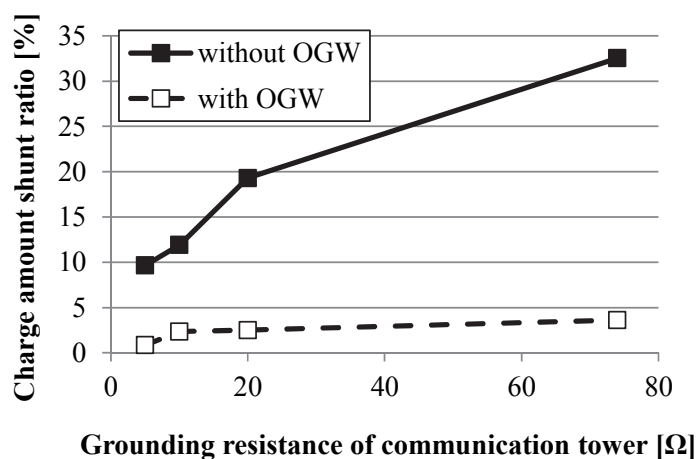
図 3-23 無線通信設備への電力供給方法と需要家機器通過電荷量の関係



(a) 引込線



(b) 需要家機器



(c) 柱上変圧器保護用避雷器

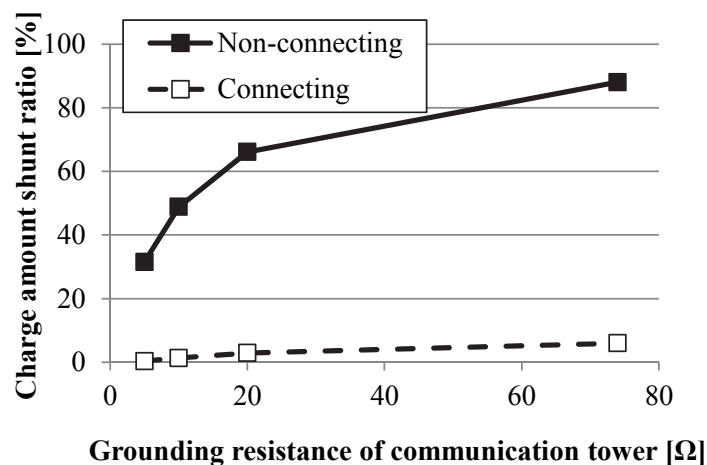
図3-24 架空地線の有無が各部を通過する電荷量に与える影響

(iii) 通信鉄塔接地と配電線接地の連接接地の効果(3.3.3項の対策の効果検証)

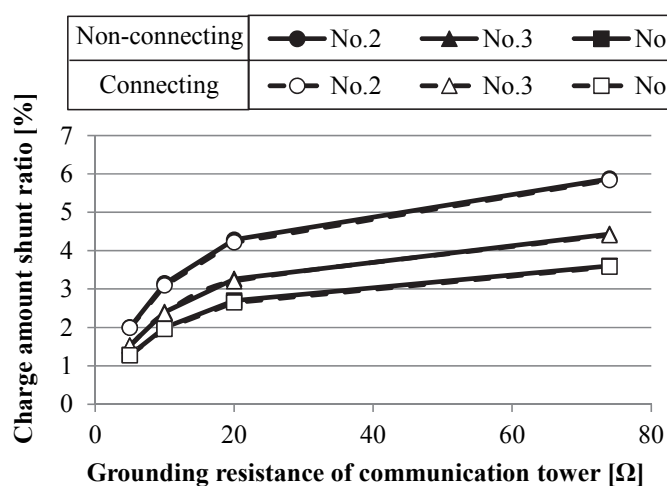
3.4 節の実験において、通信設備の接地と配線設備の接地を接続することにより、電力引込線を通過する雷電流を低減できることを定性的に示した。ここでは、雷サージ解析により、実際の設備状態により近い状態において接地の連接がどのような効果をもたらすかを示す。今回の解析では、連接接地線（ビニル絶縁電線 8 mm²）を引込線に沿わせた状態で架線し、実験時と同様に放電電圧 1500 V の放電ギャップを介して通信設備の設置と配電線の接地を接続した。

図 3-25 に Case C において、無線通信設備の接地と配電線の接地を接続した場合の解析結果を示す。図 3-25(a)から、無線通信設備と配電線の接地を接続することによって、引込線を通過する雷電流の電荷量が大幅に減少していることが分かる。これは、引込線を通過する電流の波高値および波尾長が低減したためである。引込線通過電流の減少は、通信設備にとっては設備内の機器の故障リスクの低減、配電線にとっては引込線に接続される電力量計や柱上変圧器の故障リスクの低減につながり、通信設備および配電線の双方にとって、接地の連接は効果的な対策である。なお、連接接地線の効果は通信設備内に施設される SPD の特性等によっても変化する可能性があるため、この点については、今後さらなる検討が必要と考えられる。

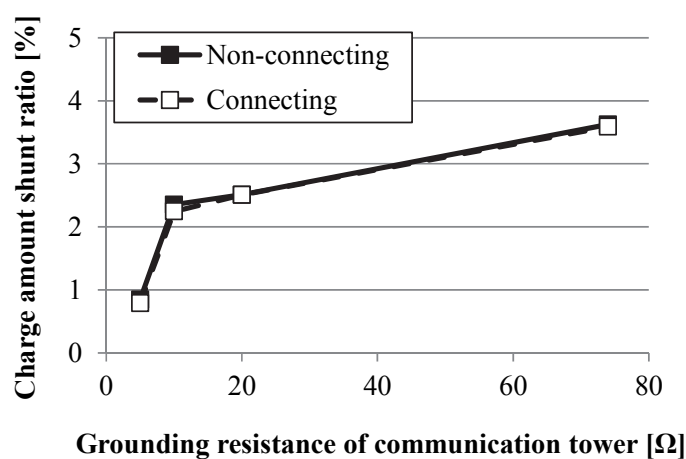
また、図 3-25(b)および図 3-25(c)に示すように通信設備と配電設備の接地を接続した場合であっても、一般の需要家機器や柱上変圧器保護用避雷器を通過する雷電流様相は変化しないため、雷害対策の観点からは接地の連接が他の設備に悪影響を及ぼすことはない。



(a) 引込線



(b) 需要家機器



(c) 柱上変圧器保護用避雷器

図3-25 無線通信設備の接地と配電線の接地の接続の有無が各部を通過する電荷量に与える影響
(架空地線が架線された場合の結果)

3.6 第 3 章のまとめ

本章では、インパルス電圧発生装置および試験配電線を用いた実規模試験および XTAP を用いた雷サージ解析の結果から、無線通信設備雷撃時の配電線および需要家機器の効果的な逆流雷対策についての検討を行った。この結果から、以下のことが明らかとなった。

- (1) 専用の柱上変圧器により無線通信設備に電力供給を行った場合には、通信鉄塔から逆流する雷電流が高圧配電線や配電線の接地に分流するため、無線通信設備と需要家機器の電力供給を同一の柱上変圧器から行う場合よりも、需要家設備に流入する雷電流が減少し、需要家機器の雷被害低減に効果的である。
- (2) 専用の柱上変圧器で通信設備に電力を供給する際には、配電線に架空地線を架線し、雷電流の分流経路を増やすことにより、柱上変圧器を保護するための避雷器を通過する雷電流を低減できる。
- (3) 無線通信設備の接地と配電設備の接地を接続し、雷撃時に発生する両者の電位差を低減することにより、無線通信設備への電力引込線を通過する雷電流を大幅に低減できる。
- (4) 柱上変圧器 2 次側の線間へ Surge Protective Device (SPD) を取付けることにより、柱上変圧器 2 次側線間電圧および巻線通過電流の低減が可能となり、柱上変圧器の雷被害低減が期待できる。
- (5) 無線通信設備の接地抵抗値が小さいほど、雷撃時に配電線側へ逆流する雷電流を抑制可能である。

以上から、配電線側のみで雷害対策を考えるのであれば、配電線末端に無線通信設備への電力供給専用の柱上変圧器を施設し、この柱上変圧器 2 次側線間に SPD を施設、さらに配電線に架空地線を架線することによって、柱上変圧器や避雷器といった配電機器および一般住宅内の需要家機器の雷被害の軽減が期待できる。更に、可能であれば、無線通信設備の接地と配電線の接地を接続し、雷撃時に発生する通信設備と配電設備の電位差を低減することにより、無線通信設備への電力引込線を通過する雷電流の大幅な低減効果が期待できる。

本研究成果は、近年急激に増加している無線通信設備から配電線への逆流雷による配電線および需要家機器の雷被害の低減に向け重要な研究成果であると考えられる。本研究の成果を受け、著者らは、図 3-26 に示す逆流雷対策装置を開発し、日本海沿岸に位置する無線通信設備に電力を供給する配電線に取付け、その効果について検証を進めている^[3,14]。



(a) 外観



(b) 配電線への取付け例

図 3-26 開発した逆流雷保護装置の実配電線への取付け状況^[3, 14]

第 3 章の参考文献

- [3.1] 横山茂, 杉本仁志, 和田勝, 小出剛士, 小菅努, 中田一夫, 浦田恒則:「山頂負荷配電線の雷害対策」, 電力中央研究所報告 総合報告, No. T65 (2001)
- [3.2] K. Nakada: “Lightning Protection Methods for Customer’s Facilities Located in Mountainous Areas Facing The Sea of Japan”, *IEEE Trans PE*, Vol. 121, No. 8, pp. 918-923 (2001)
- [3.3] 岡本宏, 関岡昇三, 海老沼康光, 山本和男, 安田陽, 舟橋俊久, 横山茂:「風力発電システム落雷時の逆流雷および大地電位上昇による配電用避雷器の処理エネルギー」, 電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 6, pp. 826-855 (2008)
- [3.4] 関岡昇三:「風力発電落雷時における配電線雷サージに関する検討」, 電気学会高電圧研究会資料, HV-15-53 (2015)
- [3.5] 深山康弘:「携帯基地局, 無線通信設備の雷保護」, 電気設備学会誌, Vol. 35, No. 2, pp. 111-115 (2015)
- [3.6] 経済産業省 商務流通保安グループ編:「解説 電気設備の技術基準 第 16 版」, 文一総合出版 (2013)
- [3.7] 本田秀樹, 本郷保二, 門裕之, 横山茂:「逆流雷による配電用柱上変圧器の被害メカニズムと低圧配電線で実施する対策」, 電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 6, pp. 836-855 (2008)
- [3.8] 電気・電子機器の雷保護検討委員会編:「電気・電子機器の雷保護」, 電気設備学会 (2011)
- [3.9] 野田琢:「電力系統瞬時値解析プログラムの開発動向ー国産プログラム XTAP の開発についてー」, 電気評論, 第 96 巻, 8 号, pp. 60-65 (2011)
- [3.10] 本田秀樹, 野田琢, 浅川聡, 新藤孝敏, 横山茂, 安孫子賢二:「過渡現象解析のための配電用柱上変圧器モデルの改良」, 電気学会論文誌 B, Vol. 125, No.9, pp. 1169-1176 (2005)
- [3.11] S. Sekioka, T. Sonoda and A. Ametani: “Experimental Study of Current-Dependent Grounding Resistance of Rod Electrode”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, PWRD-5, No.3, pp.1569-1576 (2005)
- [3.12] JIS Z 9290-1:「雷保護ー第 1 部: 一般原則」 (2013)
- [3.13] K. Berger, R. B. Anderson and H. Kroninger: “Parameters of Lightning Flashes”, *ELECTRA*, No. 51, pp. 23-27 (1975)
- [3.14] 深山康弘, 佐藤智之, 石本和之:「保護装置の開発による逆流雷対策の検証」, 平成 28 年電気学会全国大会予稿集, 第 7 分冊, pp. 132-133 (2016)

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

4.1 はじめに

電力量計量機能の他に開閉機能や双方向通信機能を備えた、いわゆるスマートメータ^[4.1]の配電系統への導入が加速している。スマートメータの導入により、電気事業者は、遠隔開閉や遠隔検針が可能となるなど大幅な業務の効率化が見込める他、需要家においても契約容量や料金メニューなども容易に変更可能となる。また、近年ではスマートメータから得られる時刻別のデータの有効な利用方法の検討が精力的に進められている^[4.2]。このように、今後のスマートグリッドを支える重要な構成要素となるスマートメータの信頼性を確保することは重要な課題である。

1章で述べたように、家電機器において、機器の電子化に伴う雷被害の増大が報告されている^[4.3]。スマートメータについても、内部には、低電圧で動作する電子回路が高密度で実装されることから、従来広く用いられてきた機械式電力量計に比べ、雷サージ等の外乱に対して脆弱であることが懸念される。スマートメータの雷に対する試験規格は、国内では JIS^{[4.4]-[4.6]}において、相間に正極性標準雷インパルス電圧 5 kV もしくは 6 kV を印加し異常の有無を確認することが規定されている。また、IEC^{[4.7]-[4.10]}や ANSI^[4.11]等の海外規格においても、試験波形は多少異なるものの基本的にはインパルス耐電圧値が規定されている場合が殆どである。つまり、雷に対するスマートメータの規格は、世界的に見ても過電圧に対してのみ規定される場合が圧倒的に多い状況にあると言える。

一方で、図 4-1 に示す、スマートメータと同様の原理で電力量を測定する電子式電力量計を用いて行った過去の検討^{[4.12]-[4.14]}から、雷による電子式電力量計の故障要因として、図 4-2 に示すように、①相間もしくは各相一筐体間での絶縁破壊による故障、②過電圧を抑制するために相間に取付けられている金属酸化物バリスタ（以下、バリスタと記す）を通過する雷電流のエネルギーによるプリント基板上の配線や素子の溶断による故障、③電源側と負荷側をつなぐ電力量計内部の導体（便宜上、この導体を電源母線と記す）を通過する雷電流が作る磁界による故障の3つが存在することが明らかとなっている。

これらの故障要因の内、①については過電圧に起因しており、機械式電力量計を対象に古くから検討が行われ^{[4.15]-[4.16]}、現在の試験規格でも規定されている。スマートメータにおいても、開閉サージ等が対象ではあるものの、線間に発生する過電圧の検討が既に行われている^[4.17]。一方で、②および③の故障要因は雷電流に起因するものであり、現在の試験規格では何ら考慮されていない。こ

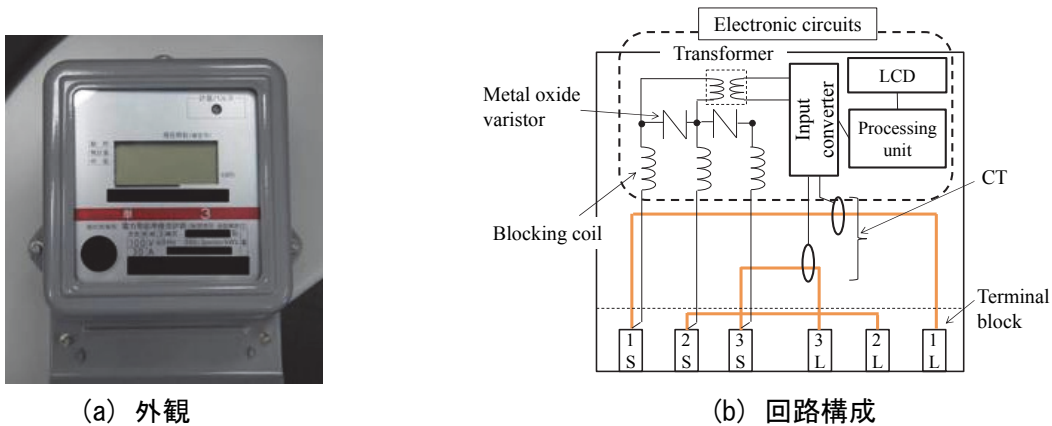


図 4-1 電子式電力量計の概要

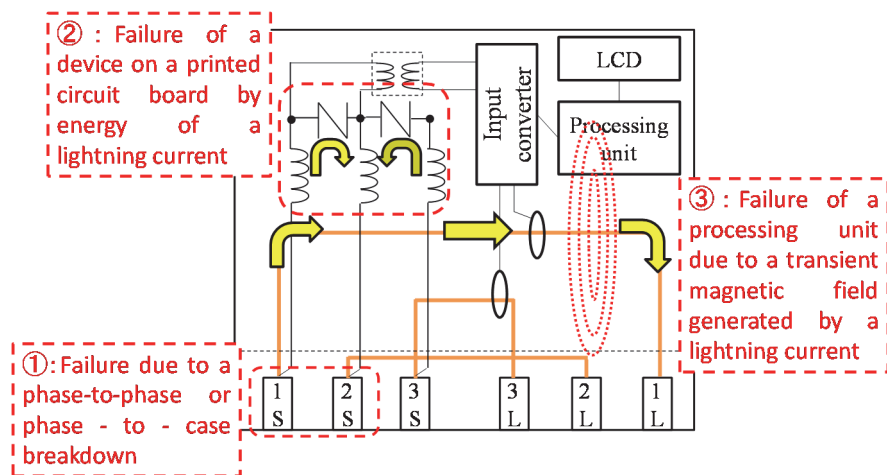


図 4-2 電子式電力量計の雷による故障要因

のため、今後のスマートメータの大量導入に備え、雷電流に起因する故障の詳細を把握することは極めて重要である。

また、これらの故障要因の②と③は雷電流に起因する故障という点は一致しているものの、その対策は全く異なっている。故障要因②の雷電流のエネルギーによる故障を防ぐ対策としては、内部のバリスタを端子ブロック部へと配置変更することが最も効果的との結論が得られている^{[4-12],[4-13]}。一方で、故障要因③の磁界による故障については、故障メカニズム自体が未だ十分に解明されておらず、その対策についても十分な結論が得られているとは言い難い。

以上の観点に立ち、本章では、スマートメータの雷による故障メカニズムの解明およびこれに対する効果的な対策手法の確立に向けた基礎検討として、配電線への雷撃時に電子式電力量計内部を通過する雷電流により発生する磁界による故障の様相を実験により明らかにするとともに、効果的な対策手法について実験および解析の両面から検討した。

4.2 本研究で用いた電子式電力量計の概要

本研究では、図 4-1 (a)に示す一般家庭で使用される単相 3 線式 60 A 用の電子式電力量計を供試体として用いた。図 4-1 (b)に示すように、この電子式電力量計には端子が 6 個あり、左側の端子（左から 1S, 2S, 3S）は電源側に、右側の端子（右から 1L, 2L, 3L）は負荷側に接続される。電源側の線間（1S-2S 間および 2S-3S 間）にはバリスタ（1 mA 通過時のバリスタ端子間電圧 $V_{1mA}=470$ V）が、その手前の電源側の各相には高周波成分除去用のブロッキングコイルが直列に配置されている。また、1S-2S 間の AC100 V を内部の演算処理部電源回路で DC3 V に変換することにより、演算処理部へ電源が供給されている。内部の回路構成やブロッキングコイルの有無等に多少の違いはあるものの、各電力会社で用いられている電子式電力量計は基本的に上記の構成となっている。

図 4-3 に今回の試験で用いた 2 種類の電子式電力量計（便宜上、これらをタイプ A およびタイプ

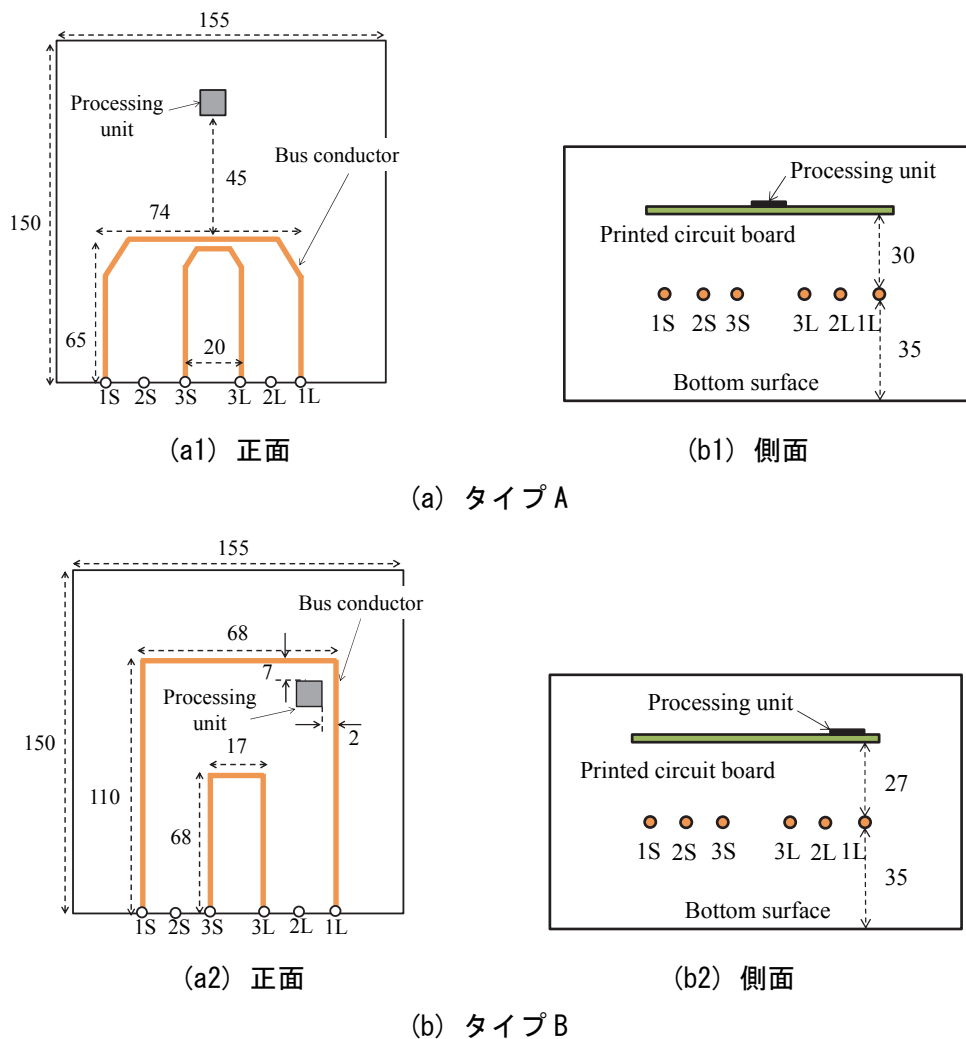


図 4-3 本研究で用いた電子式電力量計の構造

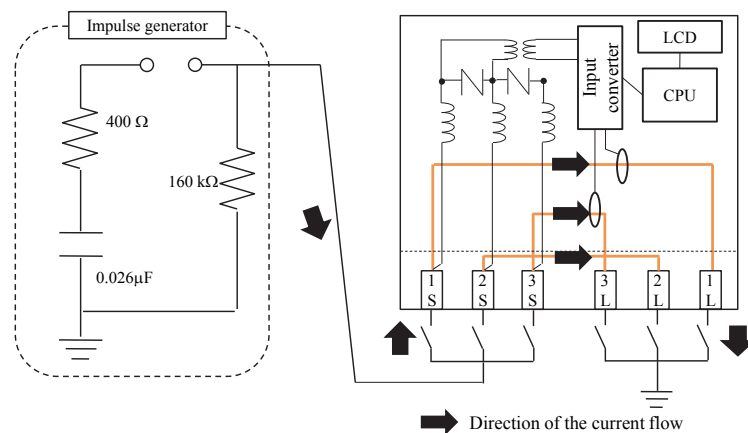
Bと記す)の内部の電源母線と演算処理部の位置関係を示す。タイプAは、演算処理部が電源母線のループの外側に位置しており、電源母線との距離も遠い。一方で、タイプBでは、演算処理部が1S-1L母線のループの内側に配置されている上、電源母線との距離も近くなっている。なお、2S-2L母線については電子式電力量計の端子ブロック内部に配置されており、電力量計内部を通過しないため図4-3には図示していない。

4.3 電子式電力量計内部の電源母線を通過する雷電流による故障様相

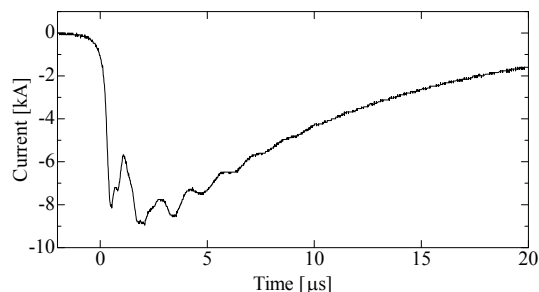
本節では、電力中央研究所塩原実験場の12 MVインパルス電圧発生装置を用いて、供試体とした2種類の電子式電力量計に、雷インパルス電流を通過させることにより、磁界による故障様相を把握する。なお、本論文では機器またはソフトウェアの損傷等による機能の喪失を電子式電力量計の故障と定義した。

4.3.1 電子式電力量計電源母線を雷インパルス電流が通過した際の故障様相

本試験では、電源母線を雷電流が通過した際の故障の閾値を把握する目的で、図4-4(a)に示す試験回路のように、インパルス電圧発生装置の出力線を電子式電力量計の電源側端子に直接接続し、



(a) 試験回路



(b) 注入電流

図4-4 電源母線を雷電流が通過した際の故障様相の検証試験の回路構成

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

負荷側端子を接地することにより、電源母線に雷インパルス電流を通過させた。4.1 節でも述べたように、現状では、電子式電力量計の雷インパルス電流に対する試験電流波形は存在しないため、今回の検討では、内部に発生する磁界が大きくなり、故障が発生しやすい過酷側の評価を行うこととして、図 4-4(b)に示すように、雷インパルス電流の波頭長をインパルス電圧発生装置の出力可能な範囲で最短の $0.5 \mu\text{s}$ 程度とした。以上の条件で、表 4-1 に示す Case I～IV の 4 つのケースについて、電源母線に注入する雷インパルス電流の波高値を約 1 kA 刻みで上昇させ、故障が発生する最小電流値およびその際の電流の時間微分値 dI/dt の最大値を求めた。

同表中の Case II の結果から分かるように、演算処理部が 1S－1L 母線のループの内側に存在し、母線との距離が近いタイプ B の電子式電力量計は、1S－1L 母線に 3 kA 程度の雷電流が流れることにより故障が発生した。一方、演算処理部が 1S－1L 母線のループの外側に存在し、母線との距離が遠いタイプ A の電子式電力量計は、1S－1L 母線に 18.2 kA の電流が流れない限り故障は発生しておらず、タイプ B に比べると磁界に対する耐性が大幅に向上している。なお、故障発生時には、いずれの電子式電力量計においても、雷電流を電源母線に通過させた際に液晶表示が消灯し、その後電源を投入しても液晶表示が再点灯しない状況がみられた。また、2S－2L 母線および 3S－3L 母線のみを雷電流が通過した際に故障が発生しないという点において両者の結果は同一であった。

ここで示した磁界に対する耐性の違いは、①電子式電力量計の演算処理部等の内部に使用されている素子の耐性の差異、および②電源母線と演算処理部の位置関係による磁界の発生様相の差異によりもたらされたものと考えられる。そこで、次項以降では、それぞれの要因について検討を行う。

表 4-1 試験ケースと各電子式電力量計の最小故障発生電流値

Case No.	Injection phase	Grounding phase	Failure-causing current [kA] (dI/dt [kA/ μs])	
			Type A	Type B
Case I	1S, 2S, 3S,	1L, 2L, 3L	18.7 kA<*	9.1 kA (26.0 kA/ μs)
Case II	1S	1L	18.2 kA (43.2 kA/ μs)	3.1 kA (7.6 kA/ μs)
Case III	2S	2L	18.7 kA<*	18.7 kA<*
Case IV	3S	3L	18.7 kA<*	18.7 kA<*

*Did not fail at the maximum output current of the impulse generator (18.7 kA).

4.3.2 演算処理部の磁界に対する耐性の評価

本論文では、電子式電力量計内部の演算処理部周辺回路の素子が最も弱く、この回路に電磁誘導される電圧が閾値を超えた際に故障が発生すると仮定し、演算処理部の磁界に対する耐性の評価を行う。供試体により演算処理部と電源母線の相対位置が異なることの影響を取り除いた上で、演算処理部が受ける磁界の強度と故障発生との関係性を評価するため、図4-5に示すように演算処理部の前面に、演算部の各辺の長さに比べ十分長い、長さ140cm、直径1cmの電流印加線を配置し、この印加線に雷インパルス電流を通過させた際の、電子式電力量計の最小故障発生電流値を測定した。

図4-6に電流印加線と電子式電力量計の演算処理部の距離 r を変化させた際に故障が発生した最小電流値を示す。同図より、何れの電子式電力量計においても電流印加線と演算処理部の距離が等しければ、故障が発生した最小電流値は等しいことが分かる。演算処理部の各辺の長さに比べ十分に長い電流印加線を通る電流 I を無限長直線電流と見なせると仮定すれば、 I が I から距離 r の点に作る磁界強度 H は

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (4.1)$$

となる。ここで、タイプAおよびタイプBの演算処理部の外周は等しい。そこで、磁界によって影響を受ける面の演算処理部の面積 S は十分に小さく、 S 内の各点で H が一様と見なせれば、演算処理部の外周に沿う回路に電磁誘導される電圧は

$$\begin{aligned} V &= -\mu_0 S \frac{dH}{dt} \\ &= -S \times \frac{\mu_0}{2\pi r} \times \frac{dI}{dt} \end{aligned} \quad (4.2)$$

となる。ここで、 μ_0 は、真空の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]) である。

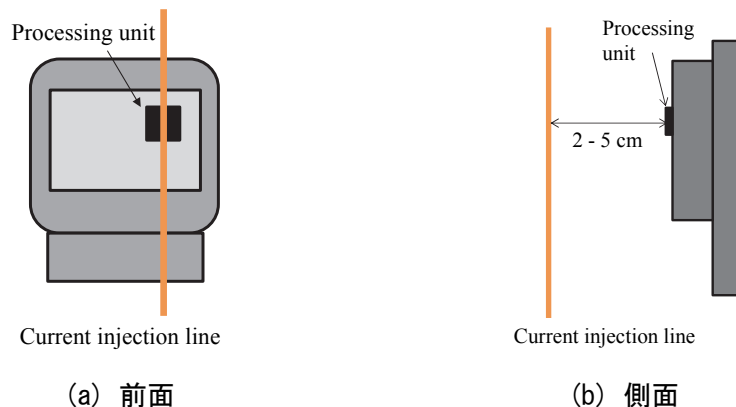


図4-5 磁界が演算処理部へ与える影響への検証試験回路

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

磁界によって影響を受ける演算処理部周辺回路の厳密な面積 S は不明であるので、単位面積 (1 cm^2) あたりに誘起される電圧を、印加電流の時間変化率 dI/dt の最大値の関数として(4.2)式より求め、故障の有無を区別した上で整理した結果が図 4-7 である。同図より、何れの電子式電力量計においても、演算処理部周辺の回路の面積が仮に 1 cm^2 であったとして、その回路に発生する電圧が

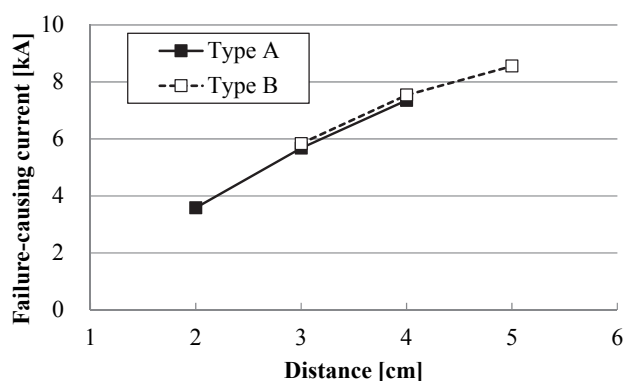
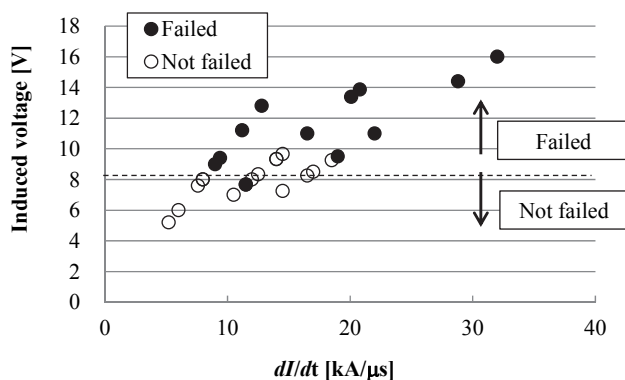
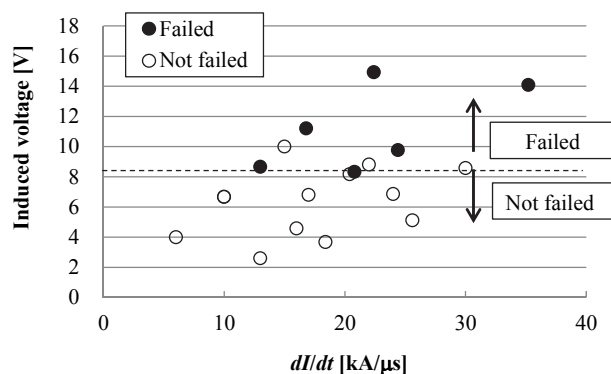


図 4-6 電流印加線と演算処理部の間の距離が最小故障発生電流値に与える影響



(a) タイプ A



(b) タイプ B

図 4-7 注入電流の峻度と演算処理部に誘導される電圧の関係

8～10 V 程度を超えると故障が発生していることが分かる。この故障の詳細なメカニズムは現時点では不明であり今後の更なる検討が必要であるものの、本項での検討より、今回検討を行った2種類の電子式電力量計の演算処理部周辺回路の磁界に対する耐性は等しい可能性が示唆される。

4.3.3 電源母線を雷電流が通過した際に演算処理部に発生する磁界の様相

4.3.1 節の実験においては、1S-1L を含めた電源母線に雷インパルス電流が流れた時に故障が発生した (Table 4.1 中の Case I および Case II)。この時のそれぞれ電子式電力量計における磁界の発生様相を簡易的に示すと図 4-8 のようになり、タイプ B の電子式電力量計では、電源母線と演算処理部の距離が近いだけでなく、演算処理部において磁界が強め合い、大きな電磁誘導電圧を生じることが分かる。しかしながら、同図は2次元で描かれており、実際の電子式電力量計での磁界分布は異なる可能性がある。そこで、図 4-9(a)に示す試験回路において、プリント基板を取り除き筐体と電源母線のみとした電子式電力量計の演算処理部の中心位置に、内径 1 cm の1巻のコイルを配置した。その上で、パルスジェネレータより図 4-9(b)の電流を電源母線に注入することで、コイルの両端に発生する電圧を測定した。このとき、コイル内に一様な磁界 H が存在し、この磁界が時間的に変化したとすると、電磁誘導起電力が発生するので、その起電力の波形を時間積分することにより磁界波形が得られることとなる。今回の検討では、コイルを3軸方向に回転させることで、各軸方向の磁界を測定した。

図 4-10 に 1S-1L 母線に電流を注入した際に、それぞれの電子式電力量計の演算処理部近傍に発生する磁界波形の測定例を示す。タイプ B ではタイプ A に比べ、演算処理部近傍の磁界強度が大きいことが分かる。これらの3軸方向の磁界を合成することにより求めた合成磁界 H の dH/dt の最大値と注入電流の dI/dt の最大値の関係を図 4-11 に示す。同図から、以下のことが分かる。

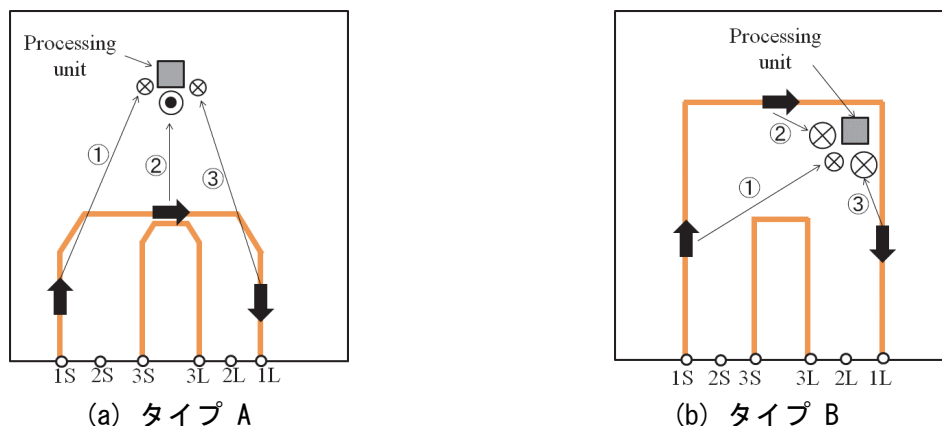


図 4-8 1S-1L 母線を雷電流が通過した際に演算処理部に発生する磁界様相

(円のサイズ：磁界強度，円の形状：磁界の向き (⊗：前面から背面，⊙：背面から前面) を示している)

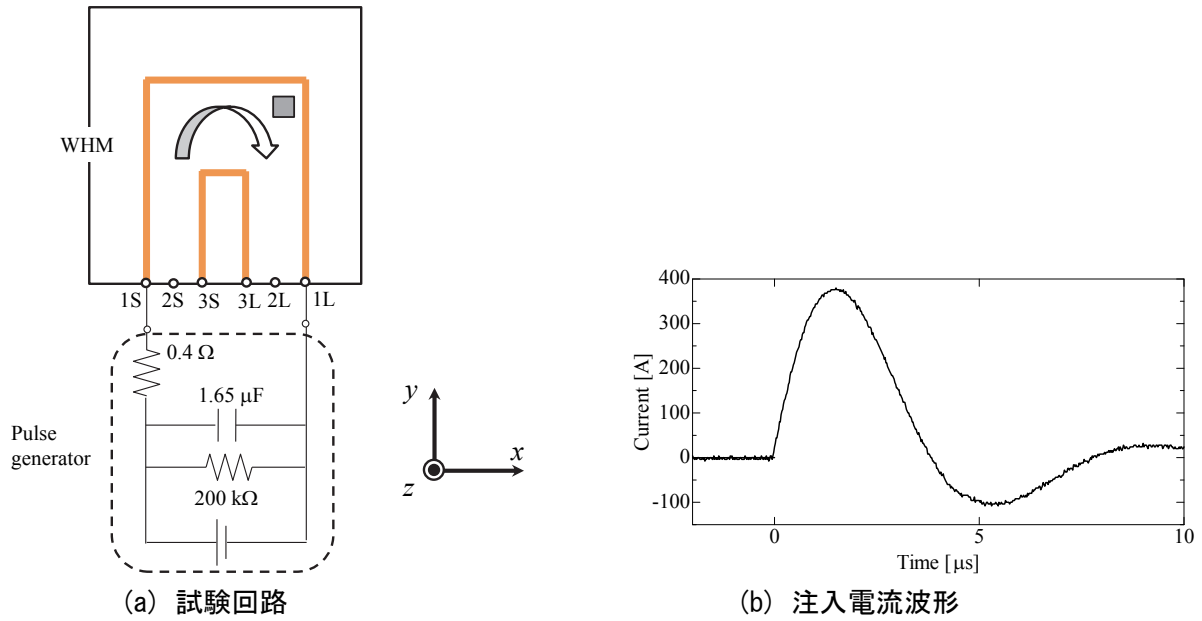


図 4-9 演算処理部近傍に発生する磁界の測定回路

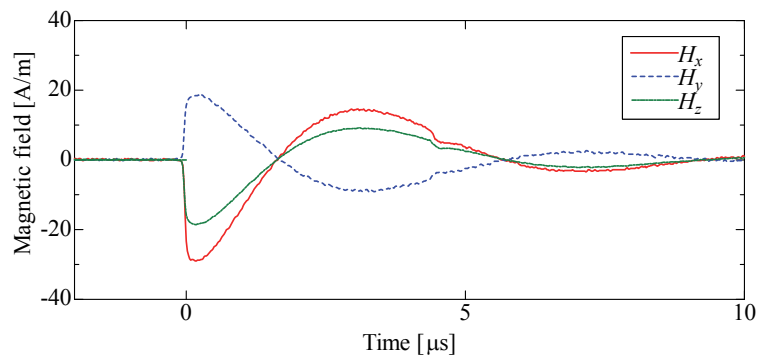
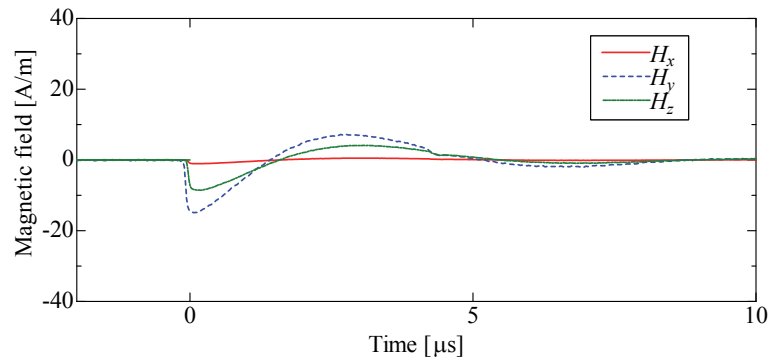
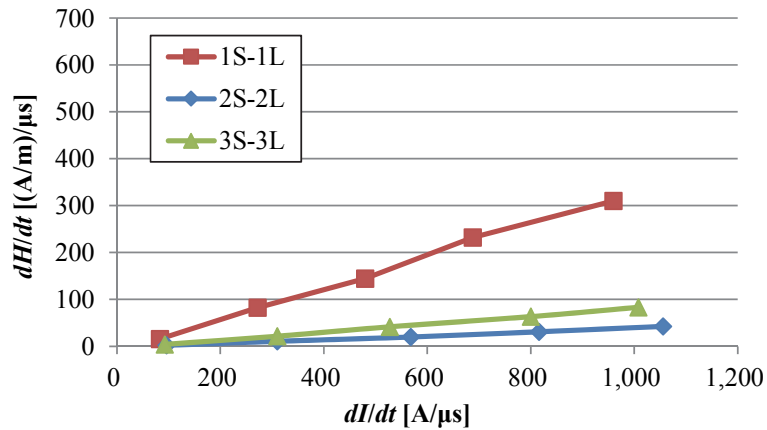
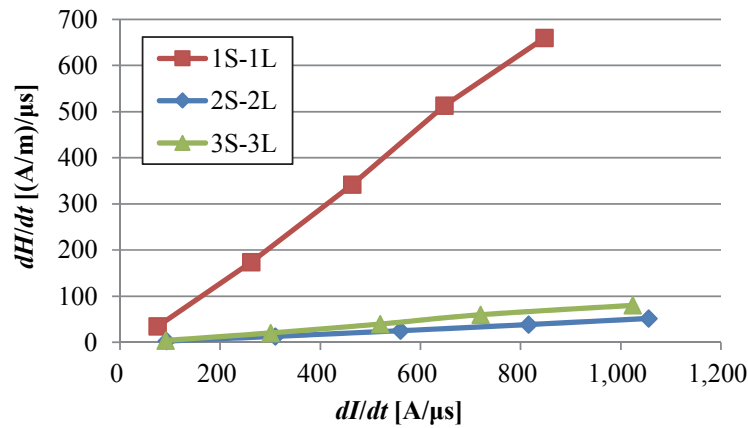


図 4-10 1S-1L 母線を電流が通過した際に演算処理部近傍に発生する磁界の測定波形



(a) タイプ A



(b) タイプ B

図 4-11 電源母線を雷電流が通過した際に演算処理部近傍に発生する合成磁界の時間変化率

- (1) 何れの電子式電力量計においても、演算処理部周辺に発生する磁界の時間変化率は 1S-1L 母線へ電流を注入した時に最も大きくなる。また、タイプ A よりもタイプ B において磁界の時間変化率は大きい。
- (2) 何れの電子式電力量計においても、2S-2L, 3S-3L 母線への電流注入時に演算処理部周辺に発生する磁界の時間変化率は、1S-1L 母線への電流注入時に比べ極めて小さい。

以上の 2 点は表 4-1 に示す実験結果、すなわち、今回供試体とした電子式電力量計では、1S-1L 母線を通る雷電流が作る磁界に起因して発生する電磁誘導電圧によって故障が発生し、かつ、これに対する耐性はタイプ A > タイプ B であることと一致する。詳細な故障メカニズムの解明という課題は残されているものの、発生する磁界の時間変化率が小さい箇所に演算処理部を配置することにより、磁界に対する電子式電力量計の耐性を大幅に向上できるという知見は、電子式電力量計やスマートメータの設計にとって重要である。

4.3.4 磁気遮蔽層の配置による磁界に対する耐性の能向上

前項において、電子式電力量計の磁界に対する耐性の向上のためには、雷電流が電源母線に流れる際に発生する磁界強度が小さい箇所に演算処理部を配置することが重要であることを明らかにした。しかしながら、演算処理部の位置の変更が困難な電子式電力量計も存在し、この際の対策として、演算処理部を磁気遮蔽層によりシールドすることが有効であると考えられる。

本節では、図 4-12 に示すように、インパルス電圧発生装置からの電流印加線と演算処理部の間に、電子式電力量計のプリント基板と同じ大きさで厚さ 1 mm の、鉄、銅、アルミニウムの 3 種類の磁気遮蔽層を演算処理部から 2 cm の位置に配置し、故障が発生する最小電流値を測定することによって、磁気遮蔽の効果を検証した。今回用いた磁気遮蔽層の透磁率および導電率は表 4-2 に示すとおりである。なお、4.2 節において、磁気遮蔽層が無い場合、この試験回路における故障発生電流値は何れの電子式電力量計においても等しいことが確認されている。よって、今回は、タイプ B のみを供試体とした。

図 4-13 に試験結果を示す。磁気遮蔽層を電流印加線と演算処理部の間に挿入することによって故障発生電流値が上昇しており、演算処理部の配置を変更せずとも、磁界に対する耐性の向上が可能であることが分かる。また、その上昇割合は鉄>銅≧アルミニウムとなっている。今回用いた磁気遮蔽層の表皮深さ δ [mm]を(4.3)式により計算した結果を図 4-14 に示すが、透磁率の高い鉄の表皮深さは銅およびアルミに比べ極めて薄くなっており、電磁シールドの効果が高いことが分かる。また、銅およびアルミの表皮深さはほぼ等しく、電磁シールドの観点からはほぼ同等の性能となっており、この点においても、実験結果と一致している。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.3)$$

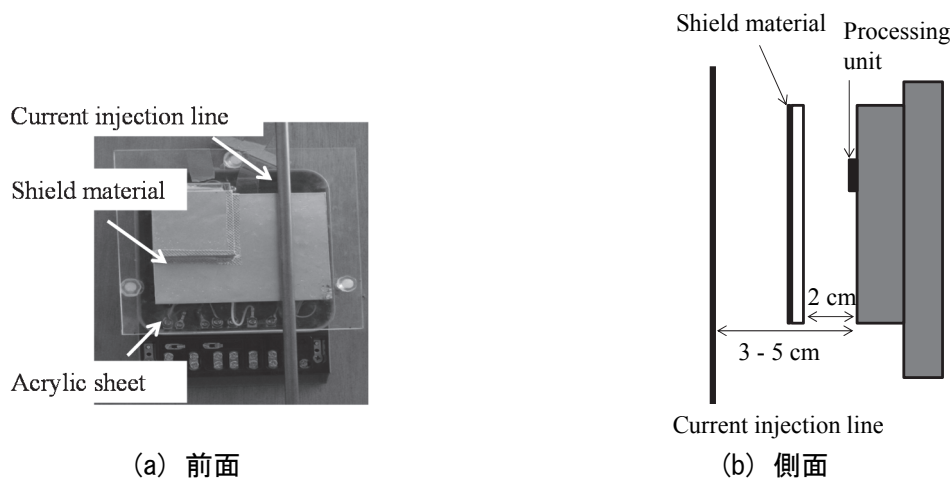


図 4-12 磁気遮蔽層の効果を検証するための試験回路

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

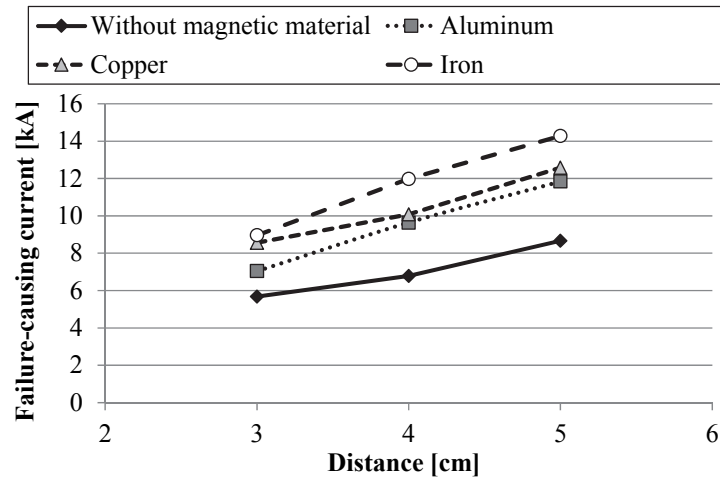


図 4-13 磁気遮蔽層の存在が最小故障発生電流値に与える影響

表 4-2 使用したシールド材の透磁率及び導電率

シールド材	透磁率 [H/m]	導電率 [S/m]
鉄 (99.8 %純鉄)	6.3×10^{-3}	9.9×10^6
銅	1.256629×10^{-6}	59.0×10^6
アルミニウム	1.256665×10^{-6}	37.4×10^6

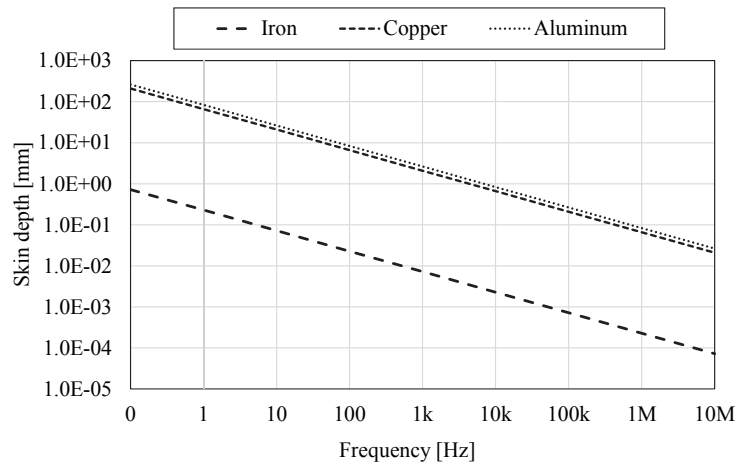


図 4-14 使用したシールド材の表皮深さ

ここで、 f : 周波数 [Hz], μ : 材質の透磁率 [H/m], σ : 材質の導電率 [S/m]である。

なお、今回の検討では、磁気遮蔽層の効果の基礎的検討のために、演算処理部の前面に位置する電流印加線と演算処理部の間に磁気遮蔽層を配置したが、実際の雷撃時には、電源母線を雷電流が通過することになる。この場合には、電源母線と演算処理部が実装されているプリント基板の間に磁気遮蔽層を配置することで同様の効果が得られると考えられる。

4.4 雷サージ解析に基づく磁界による電子式電力量計の故障発生率の算出

電子式電力量計に求められる磁界に対する耐性のレベルを評価するためには、実際に配電線に雷撃が生じた際に電子式電力量計が故障に至る割合を把握することが重要となる。これまでも、需要家屋内の雷サージ発生様相についての評価は多く実施されてきているが^{[4.18]-[4.21]}、配電線と需要家設備の責任分解点に位置する電力量計の雷被害率を定量的に評価した結果は少ない^{[4.15],[4.22]}。このため、本章では、配電線へ雷が直撃した際に、電源母線を通ずる雷電流が作る磁界に起因して発生する電磁誘導電圧による電子式電力量計の故障発生率（以下、磁界による電子式電力量計の故障発生率と記す）を雷サージ解析により算定する手法を示すとともに、その手法を用いて、本研究で供試体とした2種類の電子式電力量計の雷故障発生率を評価する。なお、配電線近傍への落雷により電源母線に電磁誘導される雷電流は、表4-1に示すような故障を発生させる可能性のある雷電流に比べ、非常に小さいと考えられることから、本手法では配電線への直撃雷のみ雷サージ解析を行う。

4.4.1 磁界による電子式電力量計の故障発生率算定手法

本手法では、図4-15に示すように、電力系統瞬時値解析プログラム XTAP^[4.23]を用いてモンテカルロ法により多数回の雷サージ解析を行い、その結果をもとに配電線へ雷が直撃した際の磁界による電子式電力量計の雷故障率評価を行う。

解析対象とした配電線路モデルの概要を表4-3に示す。まず、図4-16のように、1 km×1 kmの面積に、50 mの径間長毎に計21本のコンクリート柱が直線上に並ぶ亘長1 kmの6.6 kV配電線一回線を仮定する。高さ12.4 mの各コンクリート柱から10 m離れた位置には、幅が10 mかつ高さが10 mの需要家家屋が配電線と平行に一軒ずつ並んで存在している。なお、今回の検討は、配電線への直撃雷のみを解析対象とすることから、計算を簡単にするため、需要家家屋のx軸方向の大きさは無視した。

図4-17に示す解析モデルのように、高圧配電線導体には、図4-18(a)に示すV-I特性の避雷器と、文献[4-24]で提案されているモデルで模擬した柱上変圧器が取り付けられている。配電線へ雷が直撃した際には、コンクリート柱に沿わせて取付けられている接地線とコンクリート柱の鉄筋の間で容易に絶縁破壊が生じ、両者が電氣的に接続された状態となることから^[4.25]、今回の計算ではコンクリート柱および接地線をまとめて1相の分布定数線路で模擬し、避雷器および柱上変圧器をこの接地線により共用接地した。また、柱上変圧器の2次側は長さ10 mの3相撚線構造の引込線（DV線）^[4.26]を介して電子式電力量計に接続されている。

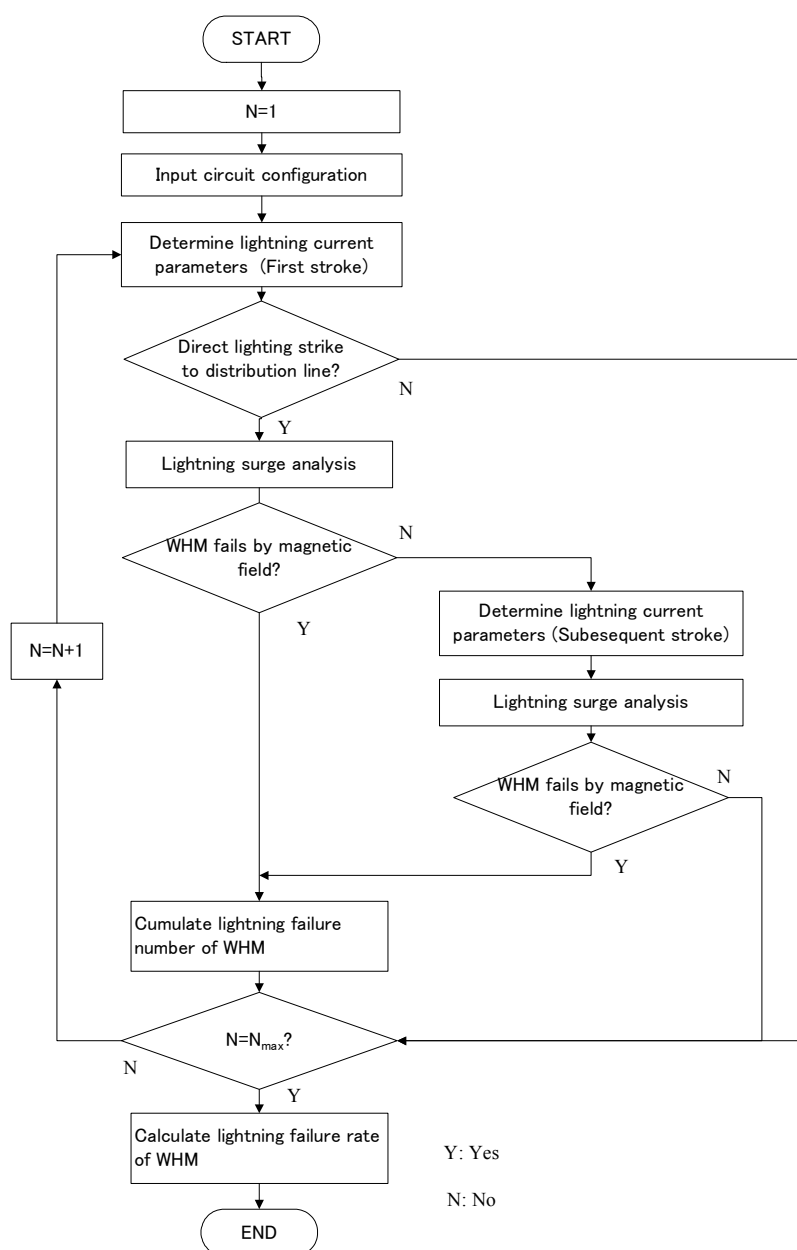


図 4-15 磁界による電子式電力量計の故障発生算定率の算定フロー

電子式電力量計については、雷電流が侵入時には、相間に取り付けられているバリスタ ($V_{1mA}=470$ V) が動作し、内部インピーダンスが十分低くなるため、図 4-18(b)に示す V - I 特性の非線形抵抗のみで模擬することとした。電子式電力量計から先の需要家負荷については、屋内配線の先に洗濯機や温水器等の接地された機器が存在する状況を想定し、長さ 10 m の 3 相の平形絶縁電線 (VVF ケーブル) ^[4-26]の先に接地機器の線間のバリスタ ($V_{1mA}=270$ V) および対地間のバリスタ ($V_{1mA}=1800$ V) ^[4-27]を模擬した図 4-18(b)に示す非線形抵抗を接続し、 $100\ \Omega$ で接地した。

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

表 4-3 雷サージ解析における設定条件

Item	Parameter
Distribution line	
6.6 kV phase wire	XLPE-insulated copper wire, cross-sectional area: 60mm ²
Span length	50 m
Service-drop wire	Polyvinyl-chloride-insulated drop service wires, diameter: 3.2 mm
Interior-wiring cable	Vinyl-insulated vinyl-sheathed flat-type cable, diameter: 3.2 mm
Length of service drop wire and Interior-wiring cable	10 m
Distributed parameter model	Constant frequency model Calculated frequency: 100 kHz
Ground resistivity	100 Ωm
Grounding resistance of customer equipment	100 Ω
Reinforced concrete pole	
Surge impedance	240 Ω
Propagation velocity	300 m/μs
Grounding resistance	30/100/200 Ω
Pole transformer	Proposed model in [4-24]
Lightning current	
Lightning current waveform	Triangular waveform
Lightning path impedance	1000 Ω

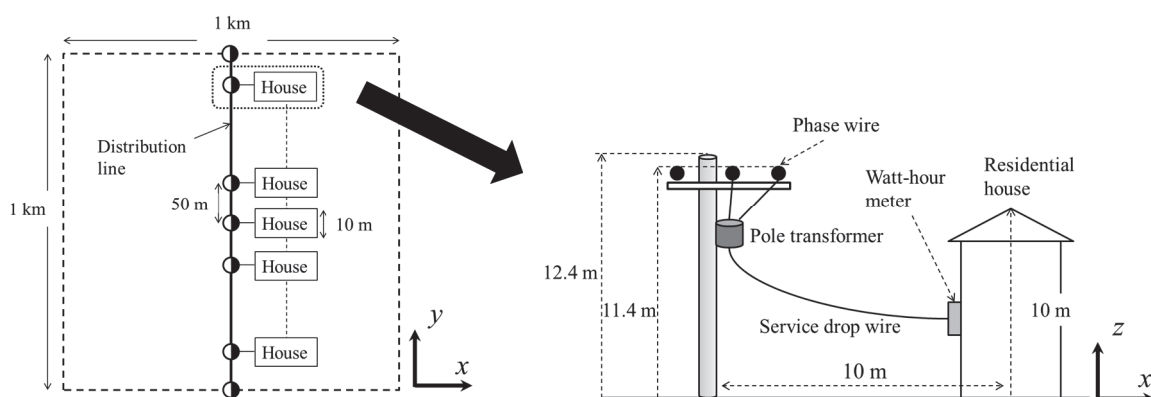


図 4-16 解析モデルにおける配電線と需要家家屋の配置

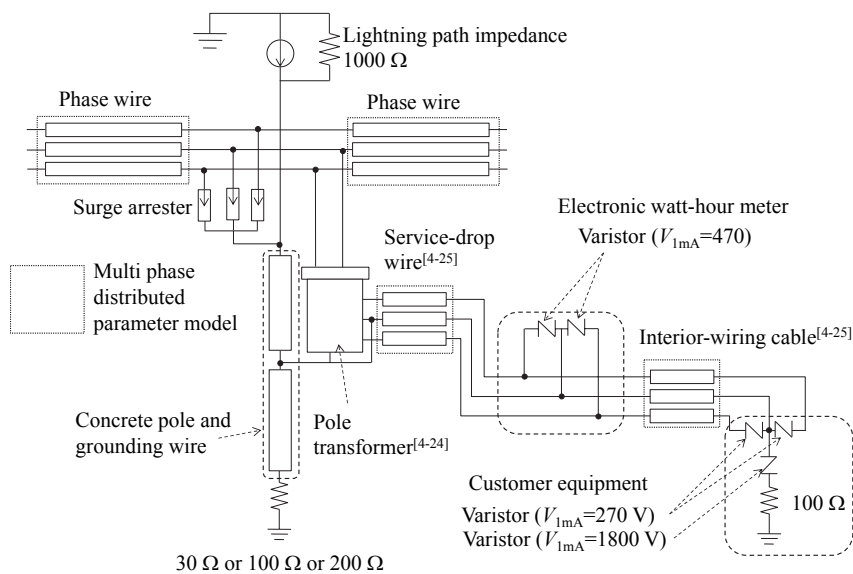
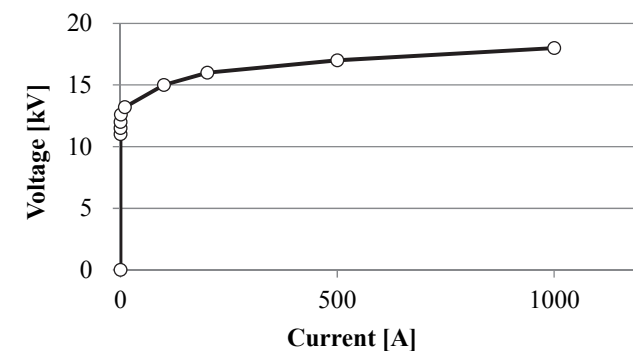
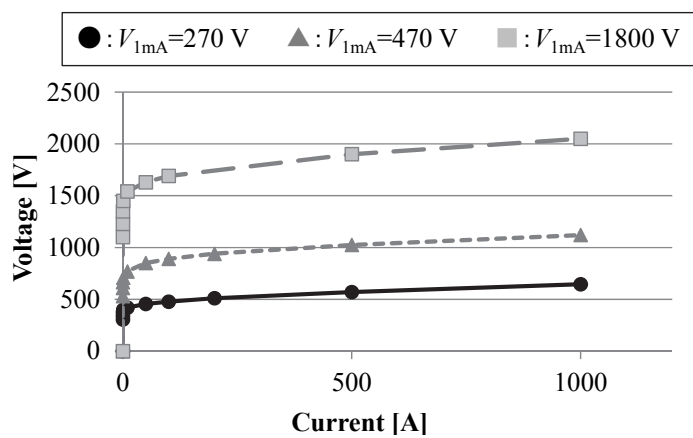


図 4-17 配電線および需要家家屋の雷サージ解析モデル



(a) 配電用避雷器



(b) 需要家機器用バリスタ

図 4-18 配電線および需要家家屋の雷サージ解析モデル

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

雷サージ解析に用いる雷電流波高値 I および波頭長 T_f のパラメータは、表 4-4 に示す Berger らにより観測された下向きの負極性第一雷撃および後続雷撃のパラメータ^[4-28]にモンテカルロ法を適用することにより決定した。なお、雷観測結果から雷電流の波高値と波頭長の間には正の相関があることが知られているため、今回の検討においても、第一雷撃の波高値と波頭長の間の相関係数を 0.37、後続雷撃の波高値と波頭長の相関係数を 0.28 とした。また、今回の計算では、決定した雷パラメータを雷サージ解析で広く用いられる三角波に適用し、雷道インピーダンスを 1000Ω とすることにより雷電流波形を模擬した。

次に、図 4-16 に示した 1.0 km 四方の検討エリア内において、乱数を発生させることにより、一つの雷について、落雷点の座標 (X, Y) を決定し、これらの落雷が配電線への直撃雷となるかどうかを図 4-19 で表される電気幾何学モデル^[4-29]により判定した。このモデルでは、第一雷撃の電流波高値 I [kA] が大きくなるほど、雷撃吸引距離 r [m] は大きくなると仮定されており、

$$r = A \times I^B \quad (4.4)$$

で表される。ここで A および B はモデル毎で異なる定数である。

表 4-4 Berger により測定された下向き負極性雷電流パラメータ^[4-28]

		95 % value	50 % value	5 % value
First stroke	Peak [kA]	14	30	80
	Wavefront duration [μ s]	1.8	4.4	18
Subsequent stroke	Peak [kA]	4.6	12	30
	Wavefront duration [μ s]	0.22	1.1	4.4

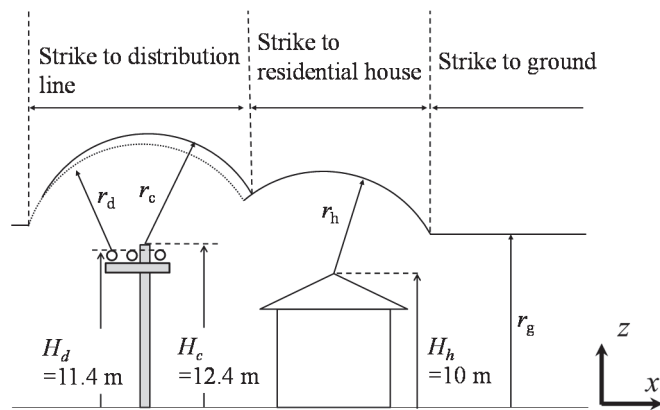


図 4-19 雷撃箇所の決定のための電気幾何学モデル

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

今回の検討では、配電線への雷撃箇所は、コンクリート柱柱頭あるいは高圧配電線導体の径間中央のいずれかとした。また、需要家家屋へ雷が直撃する箇所は家屋の頂点とし、前述のように x 軸方向の大きさは無視した。ここで、コンクリート柱の雷撃吸引距離 r_c 、配電線相導体の雷撃吸引距離 r_d および需要家家屋の雷撃吸引距離 r_h はすべて等しいとし、(4.4)式において $A=10$ 、 $B=0.65$ とすることにより求めた^[4-30]。また、大地面の雷撃吸引距離 r_g は、(4.4)式で求まるそれぞれの雷撃吸引距離に 0.9 を乗じることにより求めた^[4-30]。なお、今回の検討では雷道は大地面に対して垂直とし、後続雷撃は第一雷撃と同じ雷道を通ると仮定した。

以上の手順により、一つの雷について雷撃箇所の判定を行い、配電線への直撃雷と判定された場合には、表 4-3 および図 4-16、図 4-17 で示したモデルを用いて XTAP による雷サージ解析を行い、電子式電力量計の 1S-1L 母線を通過する雷電流の時間微分値 dl/dt の最大値が表 4-1 に示す故障発生時の値を超えれば、電子式電力量計が故障すると考える。このとき、雷の多重度は 2 と仮定し、第一雷撃で故障が発生しなかった場合のみ、後続雷撃についても計算を行うこととした。なお、4.2 節および 4.3 節の検討から、2S-2L および 3S-3L 母線を通過する雷電流により演算処理部近傍に発生する磁界のピーク値は 1S-1L 母線通過時に比べ極めて小さいことから、今回の検討では 2S-2L および 3S-3L 母線を通過する雷電流では故障は発生しないものとした。

以上の手順を N 回繰り返し実施し、電子式電力量計が故障した回数 F を累積する。これによって、電子式電力量計の故障率 P を「電子式電力量計 1 台当たりの年間の故障発生回数 [回/(台・年)]」と定義すれば、 P は

$$P = \frac{F}{N} \times \frac{1}{S} \times GFD \quad (4.5)$$

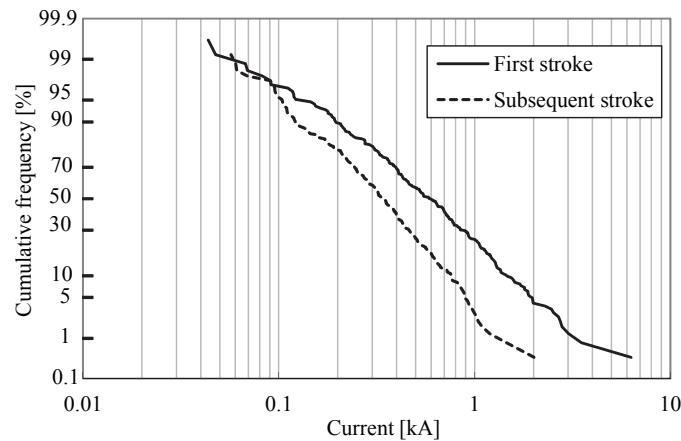
と表せる。

ここで、 F ：モンテカルロシミュレーションにおける検討エリア内での電子式電力量計の故障回数 [回]、 N ：モンテカルロシミュレーションにおける計算回数 [回]、 S ：検討エリア内の電子式電力量計の設置密度 [台/km²]、 GFD ：大地雷撃密度 [回/(km²・年)]である。なお、過去に実施された電子式電力量計の雷被害率の検討^[4-22]ではモンテカルロシミュレーションにおける計算回数 N を 1000 としているが、今回は計算結果を十分に収束させるための裕度をみて N を 3000 とした。

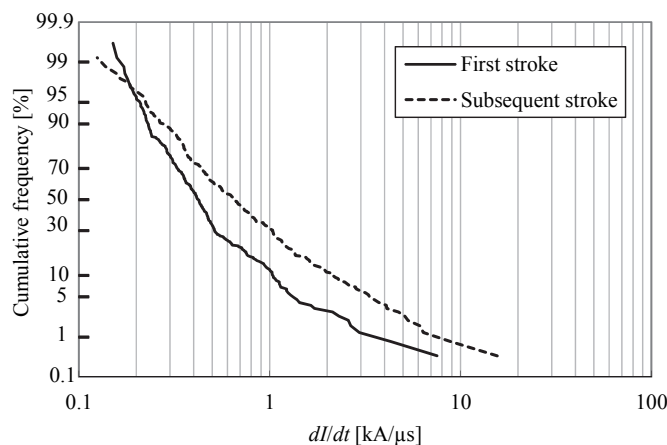
4.4.2 電子式電力量計の故障発生率算定結果

前節で説明した手法をもとに算定した、電子式電力量計内部の1S-1L母線を通過する雷電流波高値および時間微分値 dl/dt の最大値の累積頻度分布を図4-20および図4-21に示す。図4-20は、柱上変圧器の接地抵抗値が30Ωの際の第一雷撃と後続雷撃の結果を示しており、図4-21は、柱上変圧器の接地抵抗値を変化させた際の、第一雷撃についての結果を示している。

図4-20から、雷電流の波高値は第一雷撃の方が大きいことが分かる。また、図4-21より、柱上変圧器の接地抵抗値が高くなると、電子式電力量計母線を通過する雷電流の波高値および時間微分値 dl/dt は大きくなっている。表4-4に示す雷電流の累積頻度分布から分かるように、第一雷撃よりも後続雷撃の方が雷電流の波頭峻度が大きい。



(a) 雷電流波高値



(b) 雷電流の dl/dt

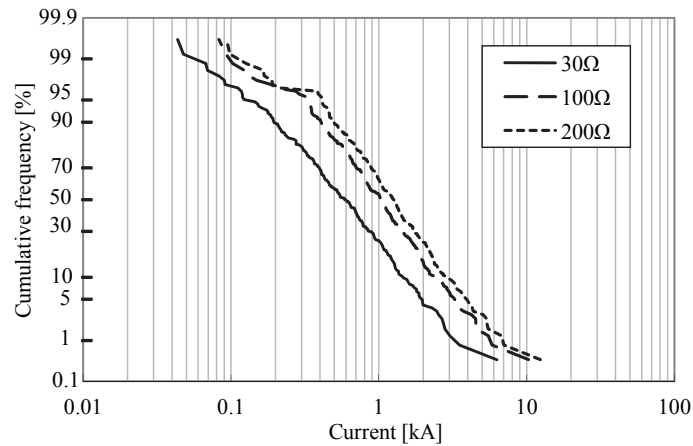
図4-20 第一雷撃および後続雷撃により電子式電力量計の1S-1L母線を通過する雷電流の累積頻度分布（柱上変圧器の接地抵抗値：30Ωの結果）

第4章 雷による電子式電力量計の故障様相とその対策

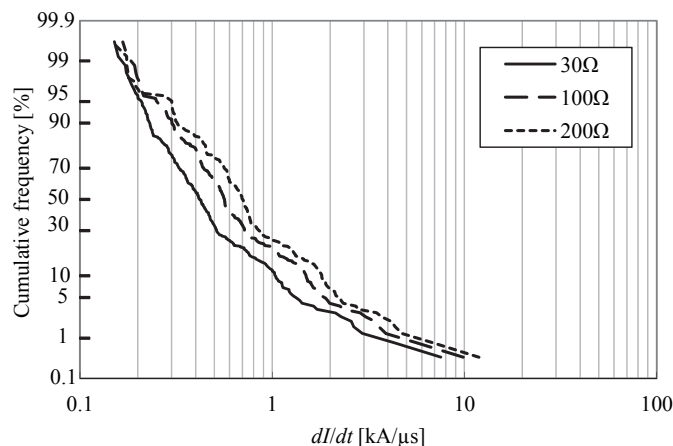
いことや、図 4-17 に示すように柱上変圧器の接地が需要家家屋の接地と並行に存在していること踏まえると、これらは妥当な結果である。

これらの結果をもとに、(4.5)式において $GFD=1$ としたときのタイプ B の磁界による電子式電力量計の故障率を算出した結果を図 4-22 に示す。電子式電力量計の磁界による故障率は、①第一雷撃よりも後続雷撃で高く、②柱上変圧器の接地抵抗値が増加するにつれ上昇している。なお、タイプ A の電子式電力量計では、磁界による故障は発生しないと算出された。このことから、演算処理部に発生する磁界の低減が極めて重要であることが分かる。

補足として、本節の計算には、①配電線から電子式電力量計への雷電流の侵入のみを考慮し、需要家アンテナへの雷撃による雷電流の侵入は考慮していない、②一つの柱上変圧器からは一軒の需要家が電力を供給されているとした、等の仮定が含まれている。需要家機器の雷被害のうち約半数



(a) 雷電流波高値



(b) 雷電流の dI/dt の最大値

図 4-21 配電線の接地抵抗値を変化させた際に電子式電力量計の 1S-1L 母線を通過する雷電流の累積頻度分布（第一雷撃の結果）

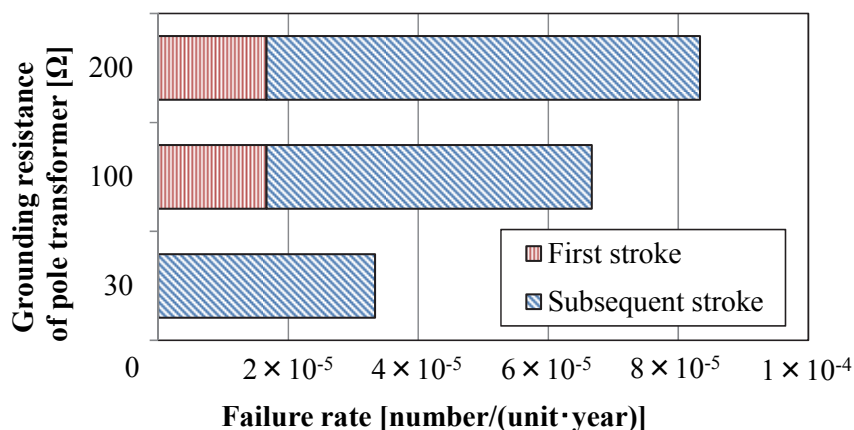


図 4-22 タイプ B の電子式電力量計の磁界による雷故障発生率の計算結果

が需要家家屋のアンテナへの雷撃に起因するものとする報告^[4.2]を踏まえると、アンテナからの雷電流の侵入を考慮することにより、電子式電力量計の故障発生率は今回見積もった値よりも上昇すると考えられる。その一方で、一つの柱上変圧器から複数の需要家が電力を供給されている場合には、電子式電力量計を通過する雷電流は今回の計算結果よりも小さくなり、故障発生率も低下すると考えられる。この他、今回は戸建て住宅について検討を行っているが、実際には集合住宅やビル等の雷による影響を受けにくい建物に多数の電子式電力量計が設置されることも多く、この場合にも電子式電力量計の雷故障発生率は今回見積もった値よりも小さくなる。このように、磁界による電子式電力量計の故障発生率は、計算および設備条件によって大きく変化するため、実際の設備実態を考慮した計算手法の構築を進め、より正確な計算を行うことが今後の重要な課題である。

4.5 第4章のまとめ

本章では、スマートメータの雷害対策手法の確立に向けた一検討として、スマートメータと同様の原理で電力量を測定する電子式電力量計を供試体として、電源母線を雷電流が通過した際の故障メカニズムの解明と効果的な雷害対策手法について検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 演算処理部と電源母線の距離が異なる 2 種類の電子式電力量計に雷インパルス電流を注入し、故障発生メカニズムについて検討を行った。この結果、電子式電力量計内部の電源母線を雷電流が通過した際に、演算処理部に発生する磁界の時間変化率が大きいほど、低い電流値で故障が発生することが分かった。このことから、発生する磁界の時間変化率が小さい箇所に演算処理部を配置することによって、電子式電力量計の磁界に対する耐性が向上できることが明らかとなった。また、演算処理部の配置の変更が困難な場合には、演算処理部と電源母線の間に透磁率の高い鉄を磁気遮蔽層として配置することによって磁界に対する耐性を向上できることを示した。
- (2) 配電線へ雷が直撃した際に電子式電力量計が故障に至る頻度を定量的に評価するために、第1雷撃と後続雷撃で異なる雷電流のパラメータや、配電線の接地抵抗値等の設備形態の違いを考慮した上で、電力系統瞬時値解析プログラムによる雷サージ解析を行い、この結果をもとに、電子式電力量計の磁界による故障発生率を算出する手法を提案した。提案した手法を用いて電子式電力量計の磁界による故障発生率を算出した結果、①雷電流の波頭峻度が大きい後続雷撃による故障発生率は、第1雷撃によるものよりも大きく、かつ、②需要家に電力を供給する柱上変圧器の接地抵抗値の増加に伴い故障が発生し易くなる可能性がある。

これまで、電子式電力量計内部の電源母線を通過する雷電流が演算処理部に作る磁界により、故障が発生することを明らかにし、これに対する対策を定量的に評価した結果は殆ど無く、本章で得られた成果は今後、電子式電力量計やスマートメータの雷害対策を検討する上で重要な知見である。

第4章の参考文献

- [4.1] 経済産業省：「スマートメータ制度検討会報告書」，
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004668/report_001_01_00.pdf> (2011)
- [4.2] 例えば，小松秀徳，西尾健一郎：「スマートメータデータの活用方法」，電力経済研究，pp.46-54 (2015)
- [4.3] 細川武，横山茂，副田正裕：「家電機器の雷被害様相の変遷と今後の課題」，電気学会論文誌 B，Vol. 129，No. 8，pp. 1033-1038 (2009)
- [4.4] JIS C 1271-1:2011：「交流電子式電力量計—精密電力量計及び普通電力量計—第1部：一般仕様」(2011)
- [4.5] JIS C 1272-1:2011：「交流電子式電力量計—超特別精密電力量計及び特別精密電力量計—第1部：一般仕様」(2011)
- [4.6] JIS C 1273-1：「交流電子式無効電力量計—第1部：一般仕様」(2011)
- [4.7] IEC 62042-11 Ed. 1.0, “Electricity metering equipment (AC) -General requirements, tests and test conditions- Part 11: Metering equipment”, (2003)
- [4.8] IEC 62043-21, “Electricity metering equipment (a.c.) -Particular requirements- Static meters for active energy (classes 1 and 2)”, (2003)
- [4.9] IEC 62043-22, “Electricity metering equipment (a.c.) -Particular requirements- Static meters for active energy (classes 0,2 S and 0,4 S)”, (2003)
- [4.10] IEC 62043-23, “Electricity metering equipment (a.c.) -Particular requirements- Static meters for active energy (classes 2 and 3)”, (2003)
- [4.11] ANSI C12.1, “Code for Electricity Metering”, (2014)
- [4.12] 浅川聡，古河征二，高橋明久，石本和之：「雷による低圧電子式電力量計の故障要因とその対策—電磁障害防止方法に関する実験的検討—」，電気学会論文誌 B，Vol. 131，No. 9，pp. 793-800 (2011)
- [4.13] 石本和之，浅川聡：「雷による低圧電子式電力量計の故障発生率算定手法の開発—電力量計の回路構成と雷による故障様相の関係—」，電力中央研究所報告 研究報告 H14009 (2014)
- [4.14] 石本和之，森亮太，浅川聡：「低圧電子式電力量計の耐雷性能の検討—雷電流の流入による誘導電圧発生様相と故障発生率評価—」，電力中央研究所報告 研究報告 H14003 (2016)
- [4.15] F. H. Busch, G. D. Williams, “Surge Protection in a Modern Watt-Hour Meter”, *Trans. AIEE*, Vol. 68, No. 1, pp. 74-78 (1948)
- [4.16] 今井康友，長山克也，正岡正憲，定方貴志：「低圧配電機器の交流アークによる雷被害発生確

- 率の推定」, 電気学会論文誌 B, Vol. 111, No. 1, pp. 117-124 (1991)
- [4.17] Z. Zhang, W. Lee, D. A. Wetz, B. Sherestha, J. Shi, A. Jackson, H. Honang, J. Fielder, “Evaluation of the Switching Surges Generated During the Installation of Legacy and Smart Electric Metering Equipment”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, pp. 2164-2172 (2013)
- [4.18] B. A. DeCarlo, V. A. Rakov, J. E. Jerauld, G. H. Schnetzer, J. Schoene, M. A. Uman, K. J. Rambo, V. Kodali, D. M. Jordan, G. Maxwell, S. Humeniuk and M. Morgan, “Distribution of Currents in the Lighting Protective System of a Residential Building –Part I: Triggered- lightning experiments”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 23, No. 4, pp. 2439-2446 (2008)
- [4.19] A. Asakawa, S. Kuramoto and J. Kato, “Experimental Study of Lighting Surge Aspect for the Circuit Mounted Distribution and Telecommunication and Customer Systems: Aspect of Lighting Current According to Grounding System of Customer Equipments”, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, Vol. 4, No. 1, pp.27-33 (2010)
- [4.20] S. Sekioka, K. Aiba, T. Miyazaki and S. Okabe, “Lightning Overvoltages in Low-Voltage Circuit for Various Lightning Striking Points”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol. 24, No. 4, pp. 3094-3014 (2010)
- [4.21] P. Wang, L. Li and V. A. Rakov, “Calculation of Current Distribution in the Lightning Protective System of a Residential House”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 40, No. 2, 7004404 (2014)
- [4.22] T. Yamada, M. Ota, T. Ootaki and S. Sekioka: “Estimation Program of Lightning Outage Rate in Power Distribution Line with Reference to Japanese Grounding System”, *Proc. of IPST 2004*, No. PST04 - 207 (2004)
- [4.23] 野田琢, 三木貫, 宜保直樹, 竹中清: 「電力系統瞬時値解析プログラムの開発 (その 1) – 基本設計 –」, 電力中央研究所報告 研究報告 H06002 (2007)
- [4.24] 本田秀樹, 野田琢, 浅川聡, 新藤孝敏, 横山茂, 安孫子賢二: 「過渡現象解析のための配電用柱上変圧器モデルの改良」, 電気学会論文誌 B, Vol. 124, No.9, pp. 1169-1176 (2004)
- [4.25] 吉永淳, 碓氷光伸, 園田敏雄, 浅川聡, 関岡昇三: 「配電系統および需要家に侵入するサージの実験的評価ー接地極, コンクリート柱の過渡応答特性および需要家侵入サージー」, 電気学会論文誌 B, Vol. 124, No. 4, pp. 488-496 (2004)
- [4.26] 松浦進, 野田琢, 中村真敏, 坂井洋志: 「雷サージ解析のための引込線および屋内配線のモデリング」, 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 2, pp. 246-248 (2010)
- [4.27] (社)電気設備学会編, 「電気・電子機器の雷保護ーICT 社会を支えるー」, オーム社 (2011)
- [4.28] K. Berger, R. B. Anderson and H. Kroeninger, “Parameter s of lightning flashes”, *ELECTRA*, No. 41,
-

pp. 23-27 (1974)

- [4.29] H. R. Armstrong and E. R. Whitehead, “Field and Analytical Studies on the Transmission Line Shielding”, *IEEE Trans. Pow. App. Sys.*, Vol. PAS-87, pp. 270-281 (1968)
- [4.30] “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”, *IEEE Std. 1410-2010* (2010)

第5章 結論

発電所で発電した電気を需要家設備に届ける電力流通設備の中で、配電線は、①送変電設備と比べ絶縁階級が低い、②設備が面的なネットワークを構成しており、膨大な設備量を有する、③需要家設備に直結しており、配電線での事故が直接需要家に影響を及ぼす、等の特徴を有している。これらの理由により、電力流通設備の供給支障事故件数の中でも、配電線の事故件数は最も多く、これまでも電気事業者は、安定した電力供給のために、配電線の設計、運用、保守等に多大な労力を費やしてきている。

高圧配電線の供給支障事故のうち約 20 %程度は雷に起因しており、供給信頼度の確保のためには、雷による事故を低減することが重要となる。高圧配電線の雷害対策に関する研究は過去数十年にわたって行われ、これら一連の研究により高圧配電線の雷害対策は技術的にはある程度確立したといえる。このため、近年では、供給信頼度を維持しつつ電力流通設備への投資コストを低減することが新たな課題となり、費用対効果という観点から高圧配電線の雷害対策を検討することが求められている。また、近年では高機能化された電子機器が需要家設備に多数導入されたことにより、需要家機器の雷被害も顕著となってきている。いわゆる IoT 技術の進展に伴い、今後の配電系統にも低電圧で駆動する機器の導入が増加すると考えられることから、低圧配電線の雷害対策手法の確立は今後ますます重要となると考えられる。

このような背景の下、本論文では、高圧配電線から低圧配電機器に至る各設備の雷による被害メカニズムを明らかにするとともに、雷性状や配電設備構成等の地域特性を考慮して、これらの設備の雷に対するリスクを定量的に評価する手法を開発した結果について記述した。本論文で得られた知見を要約すると以下の通りとなる。

第2章では、電気事業者が保有する落雷密度データおよび配電設備データに加え、国土地理院により一般に公開されている土地利用区分データを用いることにより、雷性状や耐雷設備構成、高圧配電線密度や周辺構造物の有無等の地域毎の特性を考慮した上で、高圧配電線の雷に対するリスク評価を行う手法を提案し、これを用いた計算から以下の点を明らかにした。

(1) 高圧配電線の雷事故率を低減するためには、避雷器の施設間隔を短くすることや、避雷器と架空地線を併用することが効果的である。

(2) 電気事業者が保有する落雷密度や配電設備密度、耐雷設備構成等のデータおよび、一般に公

第5章 結論

開されている国土地理院の土地利用区分データを用いることによって、雷性状や耐雷設備構成、配電線密度や周辺構造物の有無などの地域毎の特性を考慮した上で、夏季の雷に対する雷リスク評価を実施した。この結果、提案手法により求めた雷リスク評価結果は、実際の雷事故実績を良く再現しており、提案手法の妥当性が確認できた。

従来の配電線の雷に対するリスク分析は、落雷回数や過去の雷事故実績等の経験則に基づいたものが多かったが、本論文で提案する手法を用いることによって、単位面積当りの雷事故発生率を示す「雷リスク値」という定量的な指標での評価が可能になった。本手法を用いることによって、電気事業者は、合理的な雷害対策指針の策定に向け、現状の雷害対策の効果や、追加で雷害対策を実施した際の雷事故低減効果及びこれに要するコスト等を評価可能となる。

第3章では、近年急激に増加しつつある携帯基地局等の無線通信設備の鉄塔への雷撃時に配電線に逆流する雷電流による配電線および周辺の需要家機器の雷被害の低減を目的とし、各種雷害対策の効果について実験および解析の両面から検討を行い、以下の点を明らかにした。

- (1) 専用の柱上変圧器により無線通信設備に電力供給を行った場合には、通信鉄塔から逆流する雷電流が高圧配電線や配電線の接地に分流するため、無線通信設備と需要家機器の電力供給を同一の柱上変圧器から行う場合よりも、需要家設備に流入する雷電流が減少し、需要家機器の雷被害低減に効果的である。
- (2) 無線通信設備から配電線へ逆流する雷電流により、配電線に取付けられている避雷器に多くの雷電流が通過し、避雷器の焼損が発生する可能性がある。このような場合の対策として、配電線に架空地線を架線し、雷電流の分流経路を増やすことが効果的である。
- (3) 無線通信設備から配電線へ逆流する雷電流によって、柱上変圧器2次側巻線に雷電流が流入し、柱上変圧器が焼損することがある。この対策として、柱上変圧器2次側への Surge Protective Device (SPD) の取付けの効果を検証した結果、柱上変圧器2次側線間電圧および巻線通過電流の低減が確認できた。これによって、柱上変圧器の雷被害の低減が期待できる。
- (4) 放電ギャップを介して配電線と無線通信設備の接地を接続し、等電位化を行うことにより、通信設備の電力引込線を通過する雷電流が大幅に低減できる。これにより、電力引込線に接続される柱上変圧器や電力量計の雷被害の低減が期待できる。また、放電ギャップを介して接続しているため、両者の接地は通常時は分離されており、保安面での問題も生じない。

本研究成果は、近年急激に増加している無線通信設備から配電線への逆流雷による配電線および需要家機器の雷被害の低減に向け、重要な知見である。本研究成果を受け、著者らは、無線通信設

第5章 結論

備からの逆流雷対策装置を開発し、日本海沿岸に位置する無線通信設備に電力を供給する配電線に取付けることにより、その効果について検証を進めている。

第4章では、スマートメータの雷害対策手法の確立に向けた一検討として、スマートメータと同様の原理で電力量を測定する電子式電力量計を供試体として、電源母線を雷電流が通過した際の故障メカニズムの解明と効果的な雷害対策手法について検討を行い、以下の点を明らかにした。

- (1) 演算処理部と電源母線の距離が異なる2種類の電子式電力量計に雷インパルス電流を注入し、故障発生メカニズムについて検討を行った。この結果、電子式電力量計内部の電源母線を雷電流が通過した際に、演算処理部に発生する磁界の時間変化率が大きいほど、低い電流値で故障が発生することが分かった。このことから、発生する磁界の時間変化率が小さい箇所に演算処理部を配置することによって、電子式電力量計の磁界に対する耐性が向上できることが明らかとなった。また、演算処理部の配置の変更が困難な場合には、演算処理部と電源母線の間に透磁率の高い鉄を磁気遮蔽として配置することによって磁界に対する耐性を向上できることを示した。
- (2) 配電線へ雷が直撃した際に電子式電力量計が故障に至る頻度を定量的に評価するために、第1雷撃と後続雷撃で異なる雷電流のパラメータや、配電線の接地抵抗値等の設備形態の違いを考慮した上で、電力系統瞬時値解析プログラムによる雷サージ解析を行い、この結果を基に、電子式電力量計の磁界による故障発生率を算出する手法を提案した。提案した手法を用いて故障発生率を算出した結果、①雷電流の波頭峻度が大きい後続雷撃による故障発生率は、第1雷撃によるものよりも大きく、かつ、②需要家に電力を供給する柱上変圧器の接地抵抗値の増加に伴い故障が発生し易くなる可能性があることが明らかとなった。

これまで、電子式電力量計内部の電源母線を通過する雷電流が演算処理部に作る磁界により、故障が発生することを明らかにし、これに対する対策を定量的に評価した結果は殆ど無く、本章で得られた成果は今後、電子式電力量計やスマートメータの雷害対策を検討する上で重要な知見である。

以上のように、本論文では、全章を通して、従来から多くの検討がなされている高圧配電線および、近年、雷被害が問題となっている低圧配電線や低圧配電機器、需要家機器の雷による被害メカニズムを明らかにするとともに、これらの設備の雷に対するリスクを定量的に評価する手法を開発した結果について記述した。これまで、高圧配電線や低圧配電線、通信設備および需要家機器等の

第5章 結論

雷害対策は、それぞれの事業者が個別に実施してきたが、今後、高度化が進む配電系統では、これらを一つのシステムとして考え、各設備間の協調をとった雷害対策を行うことが必要になる。このためには、本論文で得られた成果をもとに、配電系統の総合的な雷リスク評価を実施することが今後の重要な課題となる。

謝辞

本論文を取り纏めるにあたり、早稲田大学大学院 先進理工学研究科 電気・情報生命専攻 大木義路 教授より、終始、熱心な御指導と多大なる御尽力を賜りました。深く感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。

本論文を取り纏めるにあたり、有意義な御助言および御指導を賜りました、早稲田大学大学院 先進理工学研究科 電気・情報生命専攻 岩本伸一 教授、石山敦士 教授、若尾真治 教授、林泰弘 教授に厚く御礼申し上げます。

本研究は著者が電力中央研究所において行ったもので、電力中央研究所 電力技術研究所 本山英器 所長には、研究の遂行や社会人博士課程への進学に関して多大な御支援を頂きました。厚く御礼申し上げます。また、本研究全体を通して、電力中央研究所 電力技術研究所 浅川聡 塩原実験場長から、研究計画の策定や、実験の指導など多岐にわたり多大な御指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

本論文の第2章における電力流通設備の雷リスク評価をはじめとして、本研究の遂行にあたり有益な御助言を頂きました電力中央研究所 新藤孝敏 研究アドバイザーに厚く御礼申し上げます。また、本論文の第3章における無線通信設備への雷撃に伴う配電線および需要家設備の雷害対策手法に関する検討において、実験の実施にあたり御協力を頂くとともに、有益な御助言を頂きました東北電力 佐藤智之 氏および昭電 深山康弘 氏に厚く御礼申し上げます。

出向で電力中央研究所 電力技術研究所に在籍しておられました、高橋明久 氏、日高哲也 氏、吉田友一 氏（以上、現 中国電力）、川添尊夫 氏、瀬戸口誠 氏（以上、現 九州電力）からは、本研究の遂行にあたり御協力を頂くとともに、実務の面からの有益な御助言を頂きました。また、電力中央研究所 電力技術研究所 森亮太 研究員には本研究の遂行にあたり御協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

本研究の実験の実施にあたっては、電力テクノシステムズ 塩原支所の皆様より多大な御協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

以上の方々の他にも、本研究の実施にあたり、電力中央研究所 電力技術研究所 山崎健一 雷・電磁環境領域リーダーをはじめとする電力中央研究所の皆様から御指導と御協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に、長きにわたり御支援頂いた両親と、日々の心の支えとなってくれた妻 美和子、長女 陽菜に心から感謝の意を表します。

【本論文に関する研究業績】

(原著論文)

- 1) 石本和之, 川添尊夫, 日高哲也, 浅川聡:「雷サージ解析のための配電用がいしのフラッシュオーバーモデル」, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 5, pp. 480-487 (2013)
- 2) 石本和之, 浅川聡, 新藤孝敏:「需要家家屋を考慮した配電系統の雷リスク評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 9, pp. 559-568 (2015)
- 3) 石本和之, 浅川聡, 佐藤智之, 深山康弘:「無線通信鉄塔雷撃時の逆流雷に対する配電線および需要家機器の雷害対策に関する検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 6, pp. 584-595 (2016)
- 4) 吉田友一, 今田剛司, 石本和之, 浅川聡:「雷リスク評価に基づく中国地方の高圧配電線における合理的な雷害対策」, 電気学会論文誌 B, Vol. 137, No. 6, pp. 460-468 (2017)
- 5) 石本和之, 森亮太, 浅川聡, 大木義路:「配電線直撃雷による電子式電力量計の故障様相 — 電力量計内部を通過する雷電流による電磁障害とその対策 —」, 電気学会論文誌 B, Vol. 137, No. 12, pp.766-776 (2017)

(講演・国際会議)

- 1) K. Ishimoto and A. Asakawa, “Study on Lightning Hazard Evaluation for Power Distribution lines”, XII International Symposium on Lightning Protection, pp.339-343 (2013)
- 2) K. Ishimoto, M. Setoguchi and A. Asakawa, “Experimental Study of Lightning Failure Mechanism of Electronic Watt-Hour Meters”, AORC-CIGRE Technical Meeting 2014, No. 1094 (2014)
- 3) K. Ishimoto, R. Mori and A. Asakawa, “Estimation of Damage Rate of Electronic Watt-Hour Meters Caused by Transient Magnetic Field due to Direct Lightning Strokes to Distribution Line”, International Conference on Lightning Protection 2016, No.118 (2016)
- 4) Y. Yoshida, M. Setoguchi, K. Ishimoto, A. Asakawa and Satoshi Nakamura, “A Study of Rational Lightning Protection Measures for Power Distribution Lines in the Chugoku Region”, International Conference on Lightning Protection 2016, No. 83 (2016)
- 5) K. Ishimoto, Y. Yoshida and A. Asakawa, “Lightning Risk Assessment of 6.6 kV Distribution Line Considering Regional Characteristics”, Asia-Pacific International Conference on Lightning, No. 74 (2017)

(講演・国内発表)

研究業績

- 1) 石本和之，川添尊夫，日高哲也，浅川聡：「短波尾インパルス電圧における配電用がいしのスパークオーバ特性に関する検討」，平成 24 年電気学会全国大会講演論文集[7]，pp. 156-157 (2012)
- 2) 石本和之，川添尊夫，日高哲也，浅川聡：短波尾雷インパルス電圧における配電用がいしのスパークオーバモデルの検討，平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集，No. 299 (2012)
- 3) 石本和之，日高哲也，瀬戸口誠，浅川聡：「雷による電子式電力量計の故障要因に関する一検討」，平成 26 年電気学会全国大会講演論文集[7]，pp. 92-93 (2014)
- 4) 石本和之，浅川聡，長嶋友宏，瀬戸口誠，吉田友一，佐藤智之，樺澤祐一郎，深山康弘：「無線通信設備雷撃時の配電系統および需要家機器への雷電流分流様相に関する検討」，電気学会高電圧研究会資料，HV-15-31 (2015)
- 5) 吉田友一，瀬戸口誠，石本和之，浅川聡，中村里司：「中国地方の高圧配電線路における雷リスク評価に関する検討」，平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No. 351 (2015)
- 6) 石本和之，浅川聡：「電子式電力量計の雷故障発生率評価手法に関する検討」，平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No. 353 (2015)
- 7) 石本和之，森亮太，浅川聡：「配電線雷撃時に電子式電力量計内部に発生する過渡磁界による故障発生率評価」，電気学会高電圧研究会資料，HV-16-042 (2016)
- 8) 吉田友一，瀬戸口誠，石本和之，浅川聡，中村里司：「中国地方の高圧配電線路における合理的な雷害対策に関する検討」，電気学会高電圧研究会資料，HV-16-043 (2016)
- 9) 石本和之，浅川聡，佐藤智之，深山康弘：「無線通信鉄塔への雷撃時に配電線および需要家機器を通過する電荷量評価」，平成 28 年電気学会全国大会講演論文集[7]，pp. 209-210 (2016)
- 10) 深山康弘，佐藤智之，石本和之：「保護装置の開発による逆流雷対策の検証」，平成 28 年電気学会全国大会講演論文集[7]，pp. 132-133 (2016)
- 11) 石本和之，森亮太，浅川聡：「配電線雷撃時にスマートメータの線間バリスタを通過する雷電流様相に関する実験的検討」，平成 29 年電気学会全国大会講演論文集[7]，pp. 135-136 (2017)

(刊行物への掲載)

- 1) 石本和之，川添尊夫，日高哲也，浅川聡：「短波尾インパルス電圧における配電用がいしのスパークオーバモデルの提案」，電力中央研究所 研究報告，H11010 (2012)
- 2) 石本和之，浅川聡：「地域特性を考慮した高圧配電線雷ハザード評価手法の提案」，電力中央

研究業績

研究所 研究報告, H12010 (2013)

- 3) 石本和之, 浅川聡, 長嶋友宏, 瀬戸口誠, 吉田友一, 佐藤智之, 樺澤祐一郎:「無線通信鉄塔雷撃時の配電系統および需要家機器の雷害対策に関する実験的検討」, 電力中央研究所 研究報告, H14003 (2015)
- 4) 石本和之, 浅川聡:「雷による低圧電子式電力量計の故障発生率算定手法の開発ー電力量計の回路構成と雷による故障様相の関係ー」, 電力中央研究所 研究報告, H14009 (2015)
- 5) 石本和之, 森亮太, 浅川聡:「低圧電子式電力量計の耐雷性能の検討ー雷電流の流入による誘導電圧発生様相と故障発生率評価ー」, 電力中央研究所 研究報告, H15003 (2016)
- 6) K. Ishimoto, A. Asakawa and T. Shindo, “Study of Lightning Risk Evaluation of Distribution Systems”, Electrical Engineering in Japan, Vol. 198, No. 3, pp. 34-45 (2017)
- 7) K. Ishimoto, A. Asakawa, T. Sato and Y. Miyama, “Study on Lightning Protection Measures for Distribution Lines and Customer Equipment against Back Flow Lightning Current from Radio Communication Station” Electrical Engineering in Japan, Vol. 200, No. 4, pp. 30-44 (2017)

【本論文に直接関係しない研究業績】

(原著論文)

- 1) 石本和之, 野田琢, 中村真敏, 丸俊介:「雷サージ解析のための通信線など共架線のモデリング」, 電気学会論文誌 B, Vol. 131-B, No. 7, pp. 591-601 (2011)
- 2) K. Ishimoto, T. Kawazoe, T. Hidaka and A. Asakawa, “Study on Lightning Overvoltage Generated on Power Distribution Lines with Telecommunication Cables”, *IEEEJ Trans. PE*, Vol. 133, No. 12, pp. 967-973 (2013)

(講演・国際会議)

- 1) K. Ishimoto, T. Noda, M. Nakamura and S. Maru, “Modeling of Telecommunication Cables Installed with Distribution Lines for Lightning Overvoltage Studies”, International Conference on Power Systems Transients (IPST) 2011, No. 111, (2011)
- 2) K. Ishimoto, T. Kawazoe, T. Hidaka and A. Asakawa, “Study on Lightning Overvoltage Generated on Power Distribution Lines with Telecommunication Cables”, 2012 CIGRE SC C4 Colloquium in Japan (2012)

研究業績

(講演・国内発表)

- 1) 石本和之, 野田琢, 中村真敏, 丸俊介:「通信線が共架された配電線の雷サージ特性試験」, 平成 22 年電気学会全国大会講演論文集[7], pp. 74-75 (2010)
- 2) 石本和之, 高橋明久, 浅川聡:「配電線雷撃時の通信線への雷電流分流様相に関する検討」, 電気学会高電圧研究会資料, HV-10-076 (2010)

(刊行物への掲載)

- 1) 石本和之, 浅川聡, 高橋明久, 川添尊夫:「配電－通信－需要家系統の耐雷設計の検討 (その 1) ー通信線が架線された高圧配電線に発生する雷過電圧の解析的検討ー」, 電力中央研究所研究報告 H10008 (2011)

【表彰】

- 1) 電気学会 優秀論文発表賞 (2009)
- 2) 電気学会 第 68 回学術振興賞 (論文賞) (2012)
- 3) 日本電気協会 東北支部 考案功績表彰 (特別功績賞) (2016)
- 4) International Conference on Lightning Protection 2016 Young Scientist Award (2016)

